



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

STUDIUM EROZE KONTAKTŮ SPÍNACÍCH  
PŘÍSTROJŮ ZA REÁLNÝCH PODMÍNEK

CONTACT EROSION OF SWITCHGEAR UNDER REAL CONDITIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Holoubek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Josef Holoubek

**ID:** 164689

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Studium eroze kontaktů spínacích přístrojů za reálných podmínek**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Popište problematiku eroze kontaktů během vypínacího pochodu.
2. Na připraveném modelu kontaktního systému proveďte pokusy za reálných podmínek.
3. Získané výsledky přehledně vyhodnoťte a analyzujte.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] Slade P.G.: Electrical Contacts: Principles and Applications , 2. ed ( 2014), ISBN 978-1439881309

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 31.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá úbytkem materiálu, tzv. erozí kontaktů při vypínacím pochodu spínacích přístrojů.

Úvodní část je zaměřená obecně na spínací přístroje, jejich rozdělení a funkce. Dále je pak užší zaměření na kontakty spínacích přístrojů a na to, s čím je potřeba počítat při jejich návrhu a provozu. V této části se nachází i část věnovaná teoretické části týkající se eroze kontaktů, včetně vzorců pro výpočet úbytků, které jsem našel v existující literatuře.

Praktická část se zabývá konstrukcí modelu kontaktního systému a provedených pokusů na tomto modelu. Měření nebylo prováděno jen na tomto modelu, ale i na reálných přístrojích pro běžné použití, těmto měřením je také věnována praktická část.

V poslední části práce je provedena analýza naměřených hodnot.

## **Klíčová slova**

Kontakty, eroze, hmotnostní úbytek, spínací přístroj, model kontaktního systému, jistič

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the material loss - contacts erosion during switching process of the switchgears.

First part is focused on the switchgears generally, their dividing and functions. Then there is closer look on the contacts of switchgears and what is necessary to be considered during their designing a operating. In this part there is also section devoted to the theory of the contacts erosion including the formulas for material loss calculation, which I found in existing literature.

Practical part is focused on the contact system model and the measuring performed on this model. Measuring was also performed on the real switchgears for common use. There is also part devoted to this measuring.

In the last part of thesis the analyze of the measured values is performed.

## **Keywords**

Contacts, erosion, weight loss, switchgear, contact system model, circuit breaker

### **Bibliografická citace:**

HOLOUBEK, J. *Studium eroze kontaktů spínacích přístrojů za reálných podmínek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 53s. Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Studium eroze kontaktů spínacích přístrojů za reálných podmínek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

Podpis autora

# OBSAH

## Obsah

<b>1 ROZDĚLENÍ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ</b>	<b>2</b>
<b>1.1 BEZOBLUKOVÉ SPÍNACÍ PŘÍSTROJE</b>	<b>2</b>
1.1.1 ODPOJOVAČE	2
<b>1.2 SPÍNACÍ PŘÍSTROJE PRO PROVOZNÍ PROUDY</b>	<b>2</b>
1.2.1 ODPÍNAČ	2
1.2.2 STYKAČ	2
<b>1.3 PŘÍSTROJE PRO VYPÍNÁNÍ PORUCHOVÝCH A ZKRATOVÝCH PROUDŮ</b>	<b>2</b>
1.3.1 VYPÍNAČ	2
1.3.2 JISTIČ	2
1.3.3 POJISTKA	3
1.3.4 PROUDOVÝ CHRÁNIČ	3
1.3.5 VÝKONOVÝ VYPÍNAČ	3
<b>2 FUNKCE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ</b>	<b>4</b>
2.1 STAV VYPNUTO	4
2.2 STAV ZAPNUTO	4
2.3 ZAPÍNÁNÍ	4
2.4 VYPÍNÁNÍ	4
<b>3 ELEKTRICKÉ KONTAKTY</b>	<b>6</b>
3.1 STYKOVÝ ODPOR	6
3.2 CIZÍ VRSTVY NA KONTAKTECH	7
3.3 OTEPLENÍ MÍSTA STYKU, SVAŘENÍ KONTAKTŮ	9
3.4 NÁROKY NA MECHANICKOU ODOLNOST KONTAKTŮ	10
<b>4 EROZE KONTAKTŮ BĚHEM VYPÍNACÍHO CYKLU</b>	<b>11</b>
4.1 VZNIK OBLUKOVÉ EROZE	11
4.2 HODNOCENÍ EROZE	12
<b>5 MODEL KONTAKTNÍHO SYSTÉMU</b>	<b>13</b>
<b>6 MĚŘENÍ NA MODELU</b>	<b>14</b>
6.1.1 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	15
<b>7 MĚŘENÍ NA REÁLNÝCH PŘÍSTROJÍCH</b>	<b>19</b>
<b>7.1 TESTOVÁNÍ JISTIČE ZKRATEM</b>	<b>19</b>
7.1.1 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	20
7.1.2 PRŮBĚHY VELIČIN PŘI TESTOVÁNÍ	23
<b>7.2 TESTOVÁNÍ JISTIČE NADPROUDEM</b>	<b>30</b>
7.2.1 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY	31
7.2.2 PRŮBĚHY VELIČIN PŘI TESTOVÁNÍ	34
<b>7.3 TESTOVÁNÍ JISTIČE ZKRATEM</b>	<b>39</b>

7.3.1 NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY.....	39
7.3.2 PRŮBĚHY VELIČIN PŘI TESTOVÁNÍ .....	42
<b>7.4 ANALÝZA HODNOT .....</b>	<b>50</b>
<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
<b>CITOVANÁ LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>53</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1: Druhy styku: a), b) bodový; c) přímkový; d) křivkový; e) plošný [1].....	7
obr. 2: Závislost odporu ve styku na přítláčné síle pro měď a stříbro [2].....	7
obr. 3: Závislost stykového odporu na čase při konstantní $F_k$ [2] .....	8
obr. 4: Časová závislost stykového odporu při různých přítláčných silách $F_k$ [2].....	9
obr. 5: Závislost objemového úbytku materiálu na teplotě tavení materiálu [2].....	12
obr. 6: Pohled na sestavený model kontaktního systému .....	14
obr. 7: Detailnější pohled na nosič kontaktu .....	14
obr. 8: Nové kontakty před začátkem testování.....	17
obr. 9: Kontaktní dvojice AgC-AgWC po testech (AgWC vlevo, AgC vpravo).....	18
obr. 10: Kontaktní dvojice AgC-AgW po testech (AgW vlevo, AgC vpravo).....	18
obr. 11: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test .....	23
obr. 12: Fáze L1 (1 a 2) - 2. test .....	23
obr. 13: Fáze L1 (1 a 2) - 3. test .....	24
obr. 14: Fáze L2 (3 a 4) - 1. test .....	24
obr. 15: Fáze L2 (3 a 4) - 2. test .....	25
obr. 16: Fáze L3 (5 a 6) - 1. test .....	25
obr. 17: Fáze L3 (5 a 6) - 2. test .....	26
obr. 18: Fáze L3 (5 a 6) - 3. test .....	26
obr. 19: Nové pevné kontakty jističe před začátkem testování.....	27
obr. 20: Nový pohyblivý kontakt jističe před testováním.....	27
obr. 21: Kontakty fáze L1 jističe po skončení testování.....	28
obr. 22: Detail pohyblivého kontaktu L1 .....	28
obr. 23: Kontakty fáze L2 jističe po skončení testování.....	29
obr. 24: Kontakty fáze L3 jističe po skončení testování.....	29
obr. 25: Rozložení teplot na kontaktech při vypínacím cyklu [6].....	30
obr. 26: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test (1. typ testu, 25 cyklů) .....	34
obr. 27: Fáze L1 (1 a 2) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů) .....	34
obr. 28: Fáze L1 (1 a 2) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů) .....	35
obr. 29: Fáze L3 (5 a 6) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů) .....	35
obr. 30: Fáze L3 (5 a 6) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů) .....	36
obr. 31: Nové pevné kontakty jističe 3VA.....	37

<i>obr. 32: Nový pohyblivý kontakt jističe 3VA.....</i>	<i>37</i>
<i>obr. 33: Kontakty fáze L1 jističe 3VA po posledním testu nadproudem.....</i>	<i>38</i>
<i>obr. 34: Kontakty fáze L3 jističe po posledním testu nadproudem .....</i>	<i>38</i>
<i>obr. 35: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test (<math>U = 430\text{ V}</math>; <math>I = 4,4\text{ kA}</math>).....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 36: Fáze L1 (1 a 2) - 2. test (<math>U = 430\text{ V}</math>; <math>I = 4,4\text{ kA}</math>).....</i>	<i>42</i>
<i>obr. 37: Fáze L1 (1 a 2) - 3. test (<math>U = 430\text{ V}</math>; <math>I = 4,4\text{ kA}</math>).....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 38: Fáze L1 (1 a 2) - 4. test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>).....</i>	<i>43</i>
<i>obr. 39: Fáze L1 (1 a 2) - 5. test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>).....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 40: Fáze L2 (3 a 4) - 1. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>).....</i>	<i>44</i>
<i>obr. 41: Fáze L2 (3 a 4) - 2. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>).....</i>	<i>45</i>
<i>obr. 42: Fáze L2 (3 a 4) - 3. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>).....</i>	<i>45</i>
<i>obr. 43: Fáze L3 (5 a 6) - 1. Test (<math>U = 730\text{ V}</math>; <math>I = 4,43\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>46</i>
<i>obr. 44: Kontakty fáze L1 po třech testech 430 V, 4,4 kA.....</i>	<i>47</i>
<i>obr. 45: Kontakty fáze L3 po jednom testu 730 V, 4,4 kA .....</i>	<i>48</i>
<i>obr. 46: Kontakty fáze L1 po dvou testech 245 V, 16,89 kA.....</i>	<i>49</i>
<i>obr. 47: Kontakty fáze L2 po třech testech 245 V, 16,89 kA .....</i>	<i>49</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3-1: Hodnoty součinitele <math>K_n</math> pro používané kontaktní materiály [2], [3]</i> .....	6
<i>Tabulka 3-2: Tvrdost vybraných používaných kontaktních materiálů [2]</i> .....	10
<i>Tabulka 4-1: Materiálový součinitel <math>K_1</math> pro vybrané materiály [2]</i> .....	12
<i>Tabulka 4-2: Materiálový součinitel <math>K_2</math> pro vybrané materiály [2]</i> .....	12
<i>Tabulka 6-1: Kontaktní dvojice AgWC-AgC 1. test</i> .....	15
<i>Tabulka 6-2: Kontaktní dvojice AgWC-AgC 2. test</i> .....	15
<i>Tabulka 6-3: Hmotnostní úbytky kontaktní dvojice AgWC-AgC</i> .....	15
<i>Tabulka 6-4: Kontaktní dvojice AgW-AgC 1. test</i> .....	16
<i>Tabulka 6-5: Kontaktní dvojice AgW-AgC 2. test</i> .....	16
<i>Tabulka 6-6: Kontaktní dvojice AgW-AgC 3. test</i> .....	16
<i>Tabulka 6-7: Kontaktní dvojice AgW-AgC 4. test</i> .....	16
<i>Tabulka 6-8: Kontaktní dvojice AgC -AgW 4. test</i> .....	16
<i>Tabulka 6-9: Hmotnostní úbytky kontaktní dvojice AgW-AgC</i> .....	17
<i>Tabulka 7-1: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test</i> .....	20
<i>Tabulka 7-2: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 2. test</i> .....	21
<i>Tabulka 7-3: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 3. test</i> .....	21
<i>Tabulka 7-4: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1</i> .....	21
<i>Tabulka 7-5: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 1. test</i> .....	21
<i>Tabulka 7-6: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 2. test</i> .....	21
<i>Tabulka 7-7: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L2</i> .....	21
<i>Tabulka 7-8: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 1. test</i> .....	22
<i>Tabulka 7-9: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 2. test</i> .....	22
<i>Tabulka 7-10: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 3. test</i> .....	22
<i>Tabulka 7-11: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L3</i> .....	22
<i>Tabulka 7-12: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test (1. typ testu, 1 cyklus)</i> .....	31
<i>Tabulka 7-13: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)</i> .....	31
<i>Tabulka 7-14: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)</i> .....	31
<i>Tabulka 7-15: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1</i> .....	32
<i>Tabulka 7-16: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)</i> .....	33
<i>Tabulka 7-17: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)</i> .....	33
<i>Tabulka 7-18: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1</i> .....	33
<i>Tabulka 7-19: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test (<math>U = 430 \text{ V}</math>; <math>I = 4,4 \text{ kA}</math>)</i> .....	39

<i>Tabulka 7-20: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 2. test (<math>U = 430\text{ V}</math>; <math>I = 4,4\text{ kA}</math>).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 7-21: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 3. test (<math>U = 430\text{ V}</math>; <math>I = 4,4\text{ kA}</math>).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 7-22: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 4. test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 7-23: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 5. test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 7-24: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 7-25: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 1. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 7-26: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 2. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 7-27: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 3. Test (<math>U = 245\text{ V}</math>; <math>I = 16,89\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 7-28: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L2.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 7-29: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 1. Test (<math>U = 730\text{ V}</math>; <math>I = 4,43\text{ kA}</math>) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 7-30: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L3.....</i>	<i>41</i>

## SEZNAM ZKRATEK

$R_{un}$	úžínový odpor ve styku
$k_n$	součinitel závislý na materiálu
$F_K$	přítlačná síla
$F_1$	$F_1 = 1 \text{ N}$
$m$	konstanta závislá na typu styku
$R_S$	odpor ve styku
$R_{un}$	úžínový odpor ve styku
$R_P$	odpor cizí vrstvy
$R_S$	stykový odpor
$R_u$	úžínový odpor
$\rho$	rezistivita materiálu
$n$	počet mikroplošek
$r_p$	počáteční poloměr mikroplošek
$\vartheta_S$	teplota spoje
$t$	čas
$A; B; C$	materiálové konstanty závislé na okolním prostředí
$\Delta\theta$	oteplení styku
$\Delta U_k$	úbytek napětí ve styku
$I_{sv}$	svařovací proud
$\Delta U_t$	úbytek napětí ve styku při teplotě tavení
$\rho$	rezistivita
$H_Z$	tvrdost materiálu
$dV$	objemový úbytek
$K$	koeficient úměrnosti
$F_K$	přítlačná síla
$H_B$	tvrdost dle Brinellovy stupnice (vybrané prvky viz Tabulka 3-2)
$dx$	délka posuvu kontaktu po sobě
$\Delta V_K$	objemový úbytek materiálu kontaktu
$K_1$	součinitel závislý na materiálu (viz Tabulka 4-1)
$\Delta m_K$	hmotnostní úbytek materiálu kontaktu
$K_2$	součinitel závislý na materiálu (viz Tabulka 4-2)
$I$	vypínací proud

$t_p$ .....	čas od začátku testu do zahoření oblouku
$t_a$ .....	doba hoření oblouku dle měřícího SW
$t_{a1}$ .....	čas prvního uhasnutí oblouku ( $ U_a  < U_p$ ; odečteno z grafu)
$t_{a2}$ .....	čas obnovení oblouku ( $ U_a  > U_p$ ; odečteno z grafu)
$t_t$ .....	celková doba testu (konečné uhasnutí oblouku)
$U_p$ .....	napětí v době započetí hoření oblouku
$I^2 t_a$ .....	Jouleův integrál dle SW
$W_a$ .....	oblouková energie dle SW
$t_{askut}$ .....	skutečná doba hoření oblouku
$I^2 t_{askut}$ .....	skutečný Jouleův integrál
$W_{askut}$ .....	skutečná oblouková energie
$I_{aef}$ .....	efektivní hodnota zkratového proudu
$U_{aef}$ .....	efektivní hodnota napětí mezi kontakty
$K_m$ .....	materiálová konstanta použité kontaktní dvojice

## Úvod

Pro svou bakalářskou práci jsem si jako téma vybral studium eroze kontaktů spínacích přístrojů za reálných podmínek. Spínací přístroje se používají v celé škále napěťových soustav a dle toho jsou na ně kladeny různé nároky. Každý spínací přístroj obsahuje kontakty, na kterých dochází ke spojení, resp. rozpojení proudovodné dráhy přístroje. Ve své práci zaměřím na úbytek materiálu, tzv. erozi, kontaktů při vypínacím pochodu přístroje. Dalším cílem mé práce je uvést kritéria pro hodnocení eroze kontaktů a provést pokusy, ze kterých posléze vyhodnotím, jak budou zkoušené materiály vhodné pro zabudování do konstrukce spínacích přístrojů. Jako cíl pro praktickou část mé práce mám za úkol vytvořit model kontaktního systému pro provádění zkoušek a jejich následné vyhodnocování.

# **1 ROZDĚLENÍ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ**

Kritéria pro rozdělení spínacích přístrojů jsou různá. Můžeme je dělit podle napěťové soustavy a jejího typu, podle velikosti spínaného proudu, podle prostředí, pro které je určen. Základní rozdělení se provádí dle konstrukce spínacího přístroje. Dle [2] rozlišujeme několik základních konstrukcí:

## **1.1 Bezobloukové spínací přístroje**

Přístroje pro vypínání/zapínání nezatížených vedení.

### **1.1.1 Odpojovače**

Odpojovače mají za úkol spínat nebo rozpínat elektrický obvod, kterým neteče proud. Odpojovač musí mít viditelnou rozpojovací dráhu, aby bylo zjevné, v jakém stavu se zrovna nachází.

## **1.2 Spínací přístroje pro provozní proudy**

Přístroje používané v běžném provozu pro spouštění a vypínání zátěží, např. motorů, osvětlení, klimatizačních zařízení apod.

### **1.2.1 Odpínač**

Přístroj pro zapínání a vypínání malých proudů. Rozepnutí musí být podobně jako u odpojovače s viditelnou rozpojovací drahou.

### **1.2.2 Stykač**

Elektromagnetem ovládaný přístroj, který je určen pro zapínání provozních proudů, je však schopen zapnout i vypnout menší nadproudy.

## **1.3 Přístroje pro vypínání poruchových a zkratových proudů**

Používáme je jako ochranu pro koncová zařízení a vedení proti účinkům nadproudů a zkratových proudů. Zároveň slouží i jako bezpečnostní prvky pro ochranu obsluhy a údržby elektrických zařízení.

### **1.3.1 Vypínač**

Musí být schopen vypnout i zapnout elektrický obvod pod proudem a to i pokud je proud zkratový.

### **1.3.2 Jistič**

Zařízení, které je určeno pro ochranu obvodu před přetížením a zkratovými proudy. Velikost maximálního proudu, který je schopen zapnout, resp. vypnout je dána konstrukcí přístroje. Po vybavení je možné ho použít znovu.



### **1.3.3 Pojistka**

V obvodu má podobnou funkci jako jistič, tedy vypínání nadproudů a zkratů, avšak při vybavení se proudovodná dráha pojistky přeruší a pro obnovení funkce obvodu je nutno pojistku vyměnit.

### **1.3.4 Proudový chránič**

Jedná se o přístroj, který vypíná obvod v případě poruchy izolace proti zemi. V obvodech je běžně používán jako doplňková ochrana pro zvýšení bezpečnosti.

### **1.3.5 Výkonový vypínač**

Jedná se o vypínač konstruovaný pro vypínání zkratů. Samotný přístroj ovšem neobsahuje vlastní spoušť, ale reaguje na popud jiného zařízení, které měří a monitoruje veličiny v elektrické síti.

## 2 FUNKCE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ

Z hlediska funkce rozlišujeme čtyři základní stavy:

- Zapnuto
- Vypnuto
- Zapínání
- Vypínání

### 2.1 Stav vypnuto

Je to statický stav, kdy kontakty spínacího přístroje jsou od sebe v takové vzdálenosti, kdy mezi nimi nemůže dojít k průrazu prostředí a kdy obvodem neteče proud. V tomto stavu je vedení přerušeno a na kontaktech je soustředěno napětí napájecího zdroje [2].

### 2.2 Stav zapnuto

Jedná se o druhý statický stav, kdy kontakty přístroje jsou těsně spojené a protéká jimi proud k zátěži. Napětí na kontaktech je ideálně nulové, v reálném případě má ovšem místo styku svůj stykový odpor, na kterém vznikají ztráty úměrné druhé mocnině proudu. Kontakty a potažmo celá proudovodná dráha přístroje musí být navržena a zkonstruována s ohledem na tyto tepelné ztráty a nesmí dojít k takovému ohřátí, aby se začala tavit izolace v okolí kontaktů, čímž by mohlo dojít k ohrožení obsluhy přístroje [2].

### 2.3 Zapínání

Při zapínání se přibližují kontakty k sobě, tak aby vytvořili vodivý spoj. V průběhu zapínání se zmenšuje vzdálenost kontaktů a s tím se zvyšuje intenzita elektrického pole v jejich okolí. Při dosažení takové hodnoty intenzity, při které se prorazí okolní prostředí kontaktů, může vzniknout oblouk, který nataví jednotlivé kontakty. Pokud se kontakty spojí natavenými místy, může dojít k jejich svaření. Toto je negativní jev, který může působit proti následnému rozepnutí kontaktů, pokud by síla svaru byla větší, než síla rozpínacího mechanismu. Z tohoto důvodu je nutno konstruovat spínací přístroj tak, aby nemohlo jít ke svaření kontaktů [2].

### 2.4 Vypínání

Při vypínání dochází v podstatě k opačnému postupu, než při zapínání, tedy k oddalování kontaktů od sebe, ať už ručně, nebo pomocí jiného pohonného mechanismu. V tomto okamžiku dochází k přerušení proudovodné dráhy a tím i k přerušení proudu do zátěže. Změna ustáleného energetického toku ovšem nemůže být skoková a v tuto chvíli začíná mezi kontakty hořet oblouk, kterým proud dále protéká až do jeho uhašení. Při hoření oblouku jsou kontakty namáhány vysokou teplotou a může opět dojít k jejich natavení. Při spínání malých napětí a proudů nemusí dojít k zapálení oblouku, nebo je oblouk rychle ochlazen a uhašen vlivem okolního prostředí kontaktů. Pro vypínání vyšších napětí a proudů je nutno zvolit spínač, který je k tomu uzpůsoben a je vybaven zhášecím zařízením oblouku [2].

Z hlediska eroze kontaktů jsou důležité dynamické stavy, tedy zapínání a rozpínání, při kterých může dojít k zapálení oblouku a tím i k tavení materiálu kontaktů. Zejména pak při vypínacím pochodu, kdy oblouk může hořet poměrně delší dobu může dojít k odstříknutí materiálu mimo kontaktní prostor a tím dochází k nevratnému narušení kontaktní plochy.

K dalšímu úbytku materiálu může dojít také odparem materiálu, kdy materiál kontaktu působení oblouku mění své skupenství na plynné a odpaří se do okolí kontaktního prostoru.

Styková plocha může být poškozena i samotných mechanickým nárazem kontaktů do sebe.

Jelikož k narušování kontaktů dochází prakticky při každé změně stavu, je životnost spínacích přístrojů omezena na určitý počet cyklů, ten najdeme většinou v katalogu výrobce. Počet těchto cyklů je dán napětím a proudem, které spínací přístroj musí zvládnout, jeho konstrukcí a prostředím použití.

## 3 ELEKTRICKÉ KONTAKTY

### 3.1 Stykový odpor

Ideálně by stykový odpor mezi sepnutými kontakty měl být nulový, ale reálně to není možné. Navíc stykové plochy kontaktů nejsou nikdy dokonale hladké a tak protékající proud nikdy neprochází celou plochou rovnoměrně, ale náhodným počtem malých mikroplošek, tzv. úžin. Tento jev snižuje efektivní průřez styčné plochy a tím se zvyšuje odpor v místě styku. To vede k elektrickým ztrátám a ohřívání místa styku. Velikost a počet úžin je daná mechanickými vlastnostmi použitého materiálu a můžeme ji ještě ovlivnit přitlačnou silou kontaktů  $F_K$ . Čím vyšší je přitlačná síla na kontakty, tím více se stykový odpor snižuje, zároveň ale musím brát ohled na mechanickou pevnost kontaktů [2].

Odpor ve styku můžeme spočítat podle vzorce [2]:

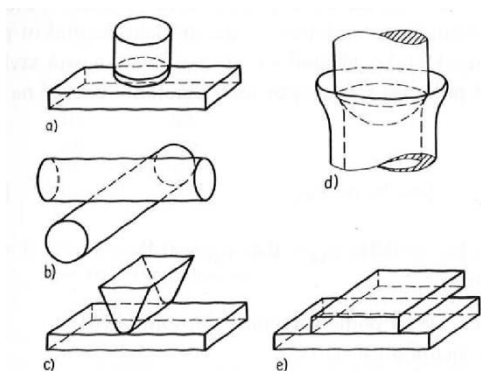
$$R_{un} = \frac{k_n}{(F_K / F_l)^m} \quad (\Omega; \Omega; N; N; -) \quad (1)$$

Součinitel  $k_n$  je závislý na mechanických vlastnostech kontaktního materiálu a na jeho rezistivitě. Velice také záleží na čistotě styčné plochy, u nových nezkorodovaných kontaktů je tato konstanta nižší, se stářím kontaktů a jejich korozí se zvětšuje. Tabulka 3-1 ukazuje velikost součinitelů používaných materiálů:

**Tabulka 3-1: Hodnoty součinitele  $K_n$  pro používané kontaktní materiály [2], [3]**

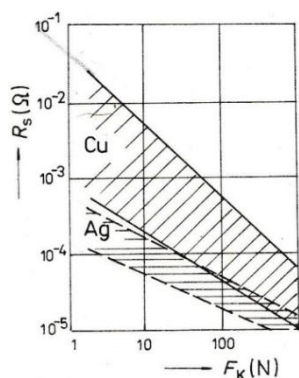
Materiál kontaktů	$k_n [\Omega]$
Stříbro	$3,8 \div 12 \cdot 10^{-4}$
Měď	$15 \div 400 \cdot 10^{-4}$
Hliník	$9 \div 20 \cdot 10^{-3}$
Měď - Hliník	$5 \div 15 \cdot 10^{-3}$
Ag-CdO	$0,8 \div 1,8 \cdot 10^{-4}$
Ag-MgO	$2 \div 6 \cdot 10^{-4}$

Z hlediska typu styku rozlišujeme 3 základní druhy - bodový ( $m = 0,5$ ), kdy k dotyku dochází např. při styku dvou kulových ploch, přímkový ( $m = 0,5 \div 0,7$ ), kdy se např. dotýkají dvě válcové plochy, a plošný ( $m = 0,6 \div 1$ ), který je výsledkem styku dvou rovinných ploch [2]. V některých případech dochází i ke styku křivkovému. [1] Typy styku jsou zobrazeny na obr. 1.



obr. 1: Druhy styku: a), b) bodový; c) přímkový; d) křivkový; e) plošný [1]

Na obr. 2 pak můžeme vidět jak stykový odpor mědi a stříbra klesá s velikostí přitlačné síly.



obr. 2: Závislost odporu ve styku na přitlačné síle pro měď a stříbro [2]

### 3.2 Cizí vrstvy na kontaktech

Při používání přístrojů v reálných podmínkách se na kontaktech mohou usazovat částice cizích materiálů, případně se interakcí s okolním prostředím na kontaktech vytvoří chemická vrstva.

Mastné vrstvy na kontaktech na sebe mohou navazovat další částice z okolí a tím se vrstva zahušťuje a zvyšuje se odpor. Tyto vrstvy se nejvíce projevují, pokud je síla ve styku malá, při větších silách se vytlačují. Některé přístroje se konstruuují tak, že se kontakty po sobě při zapínání posouvají a cizí vrstvy se tím odstraňují, to má ale jako vedlejší efekt to, že se materiál kontaktů odírá a dochází k narušení povrchu.

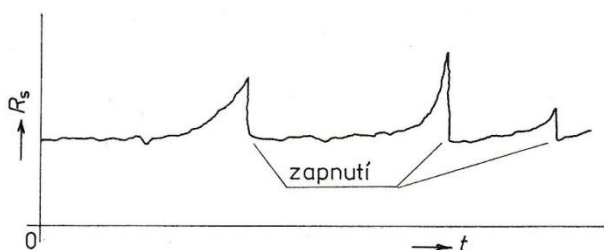
Kontakty také reagují s okolním prostředím, nejčastěji jsou vystaveny vlivu vzduchu, to vede k vytvoření chemických vrstev, nejčastěji dochází k vytvoření oxidu při reakci s kyslíkem, ale také např. sulfidů, či chloridů. Rychlost nárůstu chemické vrstvy a její konečná tloušťka je také závislá na okolní teplotě. Při různých teplotách se také u některých materiálů tvoří různé druhy chemických vrstev.

Tyto vrstvy mohou mít veliký měrný odpor, řádově až  $10^3 \Omega \cdot m$ , a mohou tak (někdy i výrazně) přispět k nárůstu stykového odporu, pro jeho přepočítání pak použijeme vzorec [2].

$$R_S = R_{un} + R_P \quad (\Omega; \Omega; \Omega) \quad (2)$$

Z používaných kontaktních materiálů je na tom z hlediska reakce s okolím zlato, které při reakci s kyslíkem vytvoří vrstvu, která zabraňuje dalšímu postupu koroze a její vliv na vodivost je v podstatě zanedbatelný. Proto se zlato používá jako materiál pro kontakty, kde je malá přítlačná síla (např. relé, konektory, apod.), případně jsou tyto kontakty alespoň zlacené. Měď a stříbro reagují především s kyslíkem a sírou, tyto vrstvy mají relativně velkou rezistivitu, ale zároveň mají většinou velmi špatné mechanické vlastnosti, takže je lze odstranit mechanicky při zapínací fázi. Měď je ale při vyšších teplotách velice náchylná na tvoření korozních vrstev na jejím povrchu, z toho důvodu se často používá povlakovaných měděných kontaktů jiným kovem (např. stříbrem či niklem), který základní materiál kontaktů chrání před erozí. Takto ochráněný měděný kontakt lze použít pro mnohem vyšší zátěžné proudy [1] [2].

Na obr. 3 je znázorněna časová závislost stykového odporu při stálé přítlačné síle. Jak je zřejmé, při sepnutí kontaktů dochází k rozrušení cizích vrstev a tím i k očištění kontaktních ploch a ke snížení odporu.



**obr. 3: Závislost stykového odporu na čase při konstantní  $F_k$  [2]**

Z obr. 3 je také zřejmé, že stykový odpor není konstantní ani během doby, kdy jsou kontakty sepnuté. Ke korozi dochází i během této doby a stykový odpor tak opět vzrůstá. Ve výsledku toto může mít i pozitivní efekt, protože s narůstajícím odporem se zvyšují i ztráty ve spoji a dochází ke zvyšování teploty. Pokud teplota dosáhne takové hodnoty, při kterém začíná cizí vrstva měknout, dochází k jejímu narušení a spoj tak dosahuje lepší vodivosti.

Nárůst teploty ale nemá jen tento pozitivní efekt, některé cizí vrstvy mají vysokou teplotu měknutí a dosažení této teploty může mít jako důsledek zničení izolace v okolí kontaktního spoje. Proto je nutné s tímto počítat při návrhu spínacího přístroje.

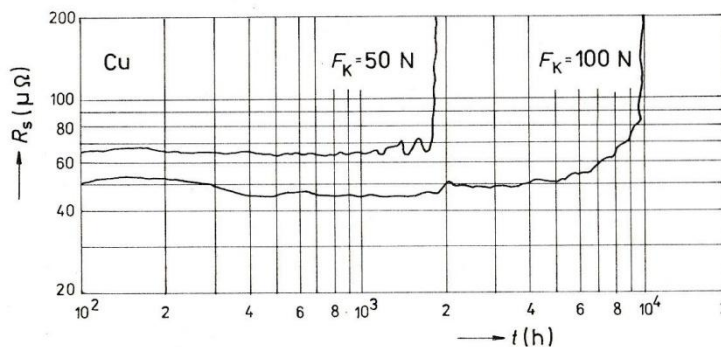
Odpor trvale zapnutých kontaktů se mění s časem a teplotou podle vzorce [2]:

$$R_s = R_u + \frac{\rho}{2n(r_p - A g_s^B t^C)} \quad (\Omega; \Omega; \Omega \cdot m; -; m; -; ^\circ C; -; s; -) \quad (3)$$

Ze vzorce lze určit dobu, kdy stykový odpor nabude nekonečně velké hodnoty:

$$t_z = \left( \frac{r_p}{A g_s^B} \right)^{1/C} \quad (s; m; -; ^\circ C; -; -) \quad (4)$$

Z toho plyne, že prodloužení doby životnosti spoje lze dosáhnout zvýšením poloměru mikroplošek, tzn. že je nutno zvýšit přitlačnou sílu kontaktů. Graficky je toto znázorněno na obr. 4.



obr. 4: Časová závislost stykového odporu při různých přitlačných silách  $F_K$  [2]

Cizí vrstvy ale mohou povrch kontaktu i ochránit před nepříznivými vlivy okolí. Příkladem je ochrana kontaktů vvn spínačů neutrálním kontaktním tukem. Při sepnutí se tuk vytlačuje z prostoru styku a vyplňuje prohlubně v kontaktní ploše, čímž ji chrání před další korozi. V místech mikroplošek tuk nezůstává, popř. je jeho vrstva proražena vysokým napětím, na funkci přístroje tedy nemá vliv [1].

### 3.3 Oteplení místa styku, svaření kontaktů

Jak je již výše uvedeno, nárůstem cizích vrstev na kontaktech se zvyšuje odpor v místě styku, což má za následek i nárůst teploty. Každý materiál má svou mezní teplotu, nad kterou se začnou tvořit na povrchu chemické vrstvy o velkých tloušťkách, které dále zhoršují kontaktní vlastnosti a přispívají k ohřevu spoje. Pokud je překročena teplota tání, kontakty se nataví a může dojít k jejich svaření, takto nastává statické svaření kontaktů. Kontakt by měl být konstruován tak, aby kontaktní úbytek nebyl větší, než v řádu desítek mV, tj. kontaktní odpor byl co nejmenší, toho dosáhneme velkou stykovou silou [1]

Dle [1] lze pro výpočet oteplení použít vzorce:

$$\Delta \Theta_{\max} = 1,75 \cdot 10^{-2} (\Delta U_k)^2 \quad (K; mV) \quad (5)$$

pro kontaktní úbytek do 50mV, nebo

$$\Delta \Theta_{\max} = 0,11 (\Delta U_k)^{1,5} \quad (K; mV) \quad (6)$$

pro kontaktní úbytek od 50 do 600 mV.

Hodnota proudu, při které se kontakty začínají svařovat je daná vzorcem:

$$I_{sv} = \frac{2\Delta U_t}{\rho\sqrt{\pi H_z}} \quad (\text{kA; mV; } \mu\Omega\cdot\text{m; Nmm}^{-2}) \quad (7)$$

### 3.4 Nároky na mechanickou odolnost kontaktů

Při každém zapnutí a poté i při udržování sepnutého stavu je kontaktní spoj namáhán mechanicky. Jak jsem již uvedl výše, pokud chceme co nejmenší stykový odpor, je nutno působit na kontakty velkou silou. Přitom je nutné brát ohled na mechanické vlastnosti materiálu, především na jeho mez pružnosti. Pokud je tato mez překročena, dochází k trvalým deformacím povrchu kontaktu [2].

Další problém nastává, pokud se při zapínání po sobě kontakty posouvají, v tom případě dochází k úbytku materiálu otěrem. Objemový úbytek materiálu je závislý na přítláčné síle, na délce dráhy, po které se po sobě kontakty posouvají a na mechanických vlastnostech materiálu. Tento úbytek můžeme vyjádřit pomocí vzorce [2]:

$$dV = K \frac{F_K}{H_B} dx \quad (\text{mm}^3; -; \text{N; Nmm}^{-2}; \text{mm}) \quad (8)$$

**Tabulka 3-2: Tvrdost vybraných používaných kontaktních materiálů [2]**

Materiál	Tvrdost (N/mm <sup>2</sup> )
Ag	150÷900
Cu	360÷1200
W	1250÷4000
Ni	800÷2500

Problém úbytku materiálu otěrem je zvláště patrný u povlakovaných kontaktů, kdy vrstva ochranného povlaku (řádově desítky  $\mu\text{m}$ ) na základním materiálu kontaktu se může odřít a tím se zhorší vlastnosti kontaktního místa. Klesá např. proudová zatížitelnost takového spoje [1].

Na kontakty se často používají kompozity, kdy se skloubí vlastnosti slučovaných materiálů a tím se zlepšují výsledné vlastnosti kompozitů. Cizí vrstvy na kontaktní ploše mohou také zmírnit úbytek materiálu otěrem, protože se otírají jako první.



## 4 EROZE KONTAKTŮ BĚHEM VYPÍNACÍHO CYKLU

### 4.1 Vznik obloukové eroze

Jak je již uvedeno výše, k obloukové erozi kontaktů dochází především při vypínacím procesu. Protože styková plocha kontaktů není nikdy dokonale hladká, tvoří se kontaktní spojení za pomoci mikroplošek rozmístěných po povrchu kontaktů. Vlivem tepelných ztrát způsobených procházejícím proudem jsou tyto mikroplošky při oddalování kontaktů od sebe nataveny a v první fázi vypínacího procesu z nich vznikají tzv. můstky, které i nadále spojují oba kontakty. Jelikož takto vytvořený můstek má v podstatě zanedbatelný průřez, průchodem proudem se dále rychle ohřívá do doby, než dosáhne teploty varu a začne se odpařovat do mezikontaktního prostoru, po odpaření můstku se částice roztaveného materiálu vlivem oblouku přenáší buď z jednoho kontaktu na druhý, nebo skončí mimo mezikontaktní prostor a tím dochází k úbytku materiálu z kontaktní plochy, tj. erozi. To negativně ovlivňuje kvalitu styčné plochy, především zvyšuje přechodový odpor, což má za následek vyšší teplotu spoje při dalším sepnutí [2].

Podle [2] patří mezi hlavní činitele ovlivňující erozi kontaktního materiálu tyto činitele:

*Velikost a druh napětí a proudu, jejich polarita a časový průběh, vlastnosti obvodu, zapínací rychlost, výchylka a počet odrazů při zapínání, přítláčná síla, vypínací rychlost, doba hoření oblouku, rychlost pohybu oblouku, druh a účinnost zhášedla, vlastnosti kontaktních materiálů, technologie jejich výroby, tvar, rozměry, a stav povrchu kontaktů, prostředí atd.*

Degradace povrchu materiálu kontaktní plochy vede ke zhoršení kvality styku, spoj se poté více ohřívá a je mnohem náchylnější na vytváření cizích chemických vrstev. To vede ke zhoršení funkce a je nutno kontakty kontrolovat, případně jejich povrch uvést do původní kvality. Znehodnocení materiálu v místě styku se dá předejít, když je kontaktní místo konstrukčně uspořádáno tak, aby byly paty oblouku vytlačovány pryč od místa styku. Oblouk poté hoří mezi nástavci z takových materiálů, které mají vysokou teplotu tavení a jsou tudíž hůře poškoditelné účinky oblouku a v případě, že dojde k erozi materiálu na nástavci, není ohrožena funkce přístroje, jelikož styčné plochy kontaktů nejsou poškozeny. [1].

## 4.2 Hodnocení eroze

Vzorec pro objemový úbytek materiálu z kontaktu pro jedno vypnutí je dle [2]:

$$\Delta V_K = K_1 \cdot I^3 \quad (\text{m}^3; \text{m}^3\text{A}^{-3}; \text{A}) \quad (9)$$

Vzorec pro hmotnostní úbytek materiálu pro jedno vypnutí je [2]:

$$\Delta m_K = K_2 \cdot I^2 \cdot 10^{-12} \quad (\text{kg}; \text{kgA}^{-2}; \text{A}) \quad (10)$$

**Tabulka 4-1: Materiálový součinitel  $K_1$  pro vybrané materiály [2]**

Materiál	$K_1 (\text{m}^3\text{A}^{-3})$
Au	$44,2 \cdot 10^{-21}$
Pt	$56,3 \cdot 10^{-21}$
Ag	$67,3 \cdot 10^{-21}$
Pd	$53,2 \cdot 10^{-21}$

**Tabulka 4-2: Materiálový součinitel  $K_2$  pro vybrané materiály [2]**

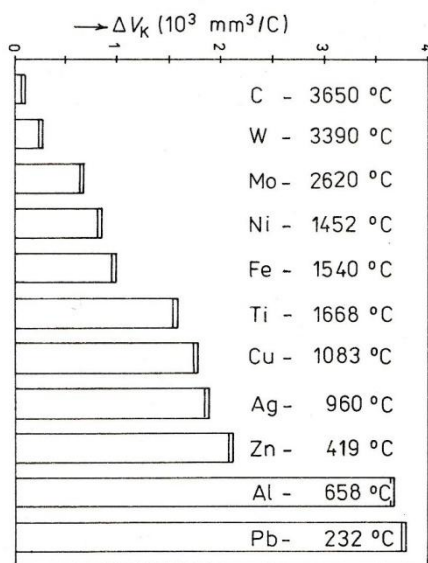
Materiál	$K_2 (\text{kgA}^{-2})$
Ag-CdO	0,08-0,6
Ag	0,5
Cu	0,6-2

Na obr. 5 je znázorněn objemový úbytek materiálu při hoření oblouku o parametrech:

$I = 12 \text{ kA}$ .....proud oblouku

$l_a = 0,8 \text{ mm}$ .....délka oblouku

$T_a = 0,85 \text{ ms}$  .....doba hoření oblouku



**obr. 5: Závislost objemového úbytku materiálu na teplotě tavení materiálu [2]**

## 5 MODEL KONTAKTNÍHO SYSTÉMU

Praktickým cílem mé práce je také vytvořit model kontaktního systému, na kterém budu zkoušet a posléze i vyhodnocovat erozi vybraných kontaktních materiálů.

Kontaktní systém je tvořen dvěma proti sobě umístěnými měděnými bloky. Aby bylo měření co nejlépe vyhodnotitelné, skládá se každý měděný blok ze dvou částí. Větší části jsou ohnuté do tvaru L a jsou využívány jako přípojný body pro napájecí napětí a zároveň slouží jako nosná část pro druhou, menší část - držák kontaktního materiálu. Jak přívodní část, tak držák kontaktního materiálu jsou vyrobeny z měděných přípojníc o rozměrech 30x10 mm. Zkoušené kontaktní materiály jsou připájeny k těmto držákům. Obě části proudovodné konstrukce jsou spojeny šroubovým spojením. Držák s připájeným kontaktním materiálem bude před i po měření zvážen (je tedy nutné, aby byl odnímatelný) a na základě toho bude vyhodnocen hmotnostní úbytek materiálu při oblouku o stanovených parametrech.

Celý proudovodný systém je pomocí držáků vyrobených z polyamidu uchycen k systému závitových tyčí. Jeden měděný blok je statický, druhým je možno po tyčích posouvat, čímž je možno nastavit vzdálenost kontaktů. Nastavení maximální vzdálenosti posuvu se provádí pomocí vymešovacích matic na každé závitové tyči. Rozměry modelu dovolují maximální možný posun cca 8cm. Díry v PA držácích jsou hladké, bez závitů. Pro posuv slouží závit vyřezaný do horního držáku posuvné části, ve které se otáčí závitová tyč a podle smyslu jejího otáčení se kontakty přibližují, či oddalují. Tato tyč je pomocí matic upevněna k ložisku, které je upevněno ve stěně pláště. Pro snazší ovládání je na této tyči připevněna rukojeť.

Opláštění celého systému je provedeno deskami z texgumoidu o tloušťce 10 mm. V těchto deskách jsou také uloženy závitové tyče pro usazení a vedení proudovodného systému. V levém boku je zároveň vsazeno oboustranně uzavřené ložisko pro ovládací závitovou tyč. Jednotlivé desky opláštění k sobě jsou sešroubovány pomocí ocelových L-profilů.

V přední stěně opláštění je díra pro průhledný průzor vyrobený z plexiskla, kterým je možno sledovat průběh hoření oblouku.

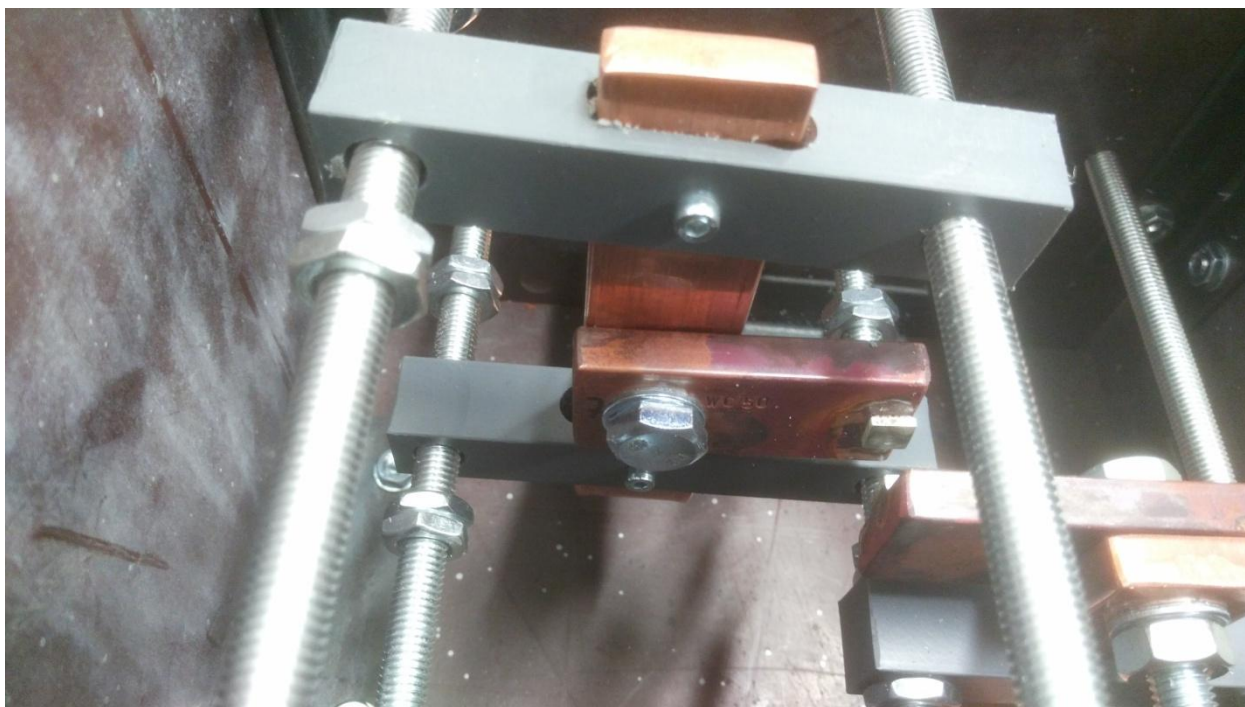
Celkové rozměry modelu jsou 250x250x290 mm (VxŠxH)

Kompletní výrobní dokumentaci modelu kontaktního systému lze nalézt v příloze 1.

## 6 MĚŘENÍ NA MODELU



obr. 6: Pohled na sestavený model kontaktního systému



obr. 7: Detailnější pohled na nosič kontaktu

Na obr. 6 a obr. 7 je výše popsáný model kontaktního systému již sestavený a připravený k testování.

Testování probíhalo na materiálech AgC, AgW a AgCW v různých poměrech příměsí ve stříbře. K dispozici bylo celkem 10 vzorků.

Nejpřednější vlastností materiálu AgC je to, že příměs uhlíku ve stříbře omezuje možnost svaření kontaktů. Nevýhodou je pak to, že není příliš odolný vůči erozi. [4]

To materiál AgW je vůči erozi odolný, při spínání a vypínání oblouku ale vytváří na povrchu vrstvy, které snižují vodivost a přispívají tak ke zvyšování teploty kontaktu, čímž se zvyšuje pravděpodobnost svaření. Z tohoto důvodu se často používá kontaktní dvojice AgW-AgC. [5]

Přítomnost karbidu wolframu v materiálu AgWC přispívá ke snižování výskytu málo vodivých plošek na kontaktu a zabraňuje tak přílišnému ohřevu kontaktu. Materiál AgWC je tak odolnější vůči svaření oproti AgW. [5]

Kontaktní materiály jsme testovali stejnosměrným napětím o hodnotách 100 V a 150 V, vzdálenost mezi kontakty pak byla nastavována mezi 8 a 10 mm. Vzhledem k tomu, že software měřicího pracoviště má omezenou maximální délku záznamu, probíhalo měření doby hoření oblouku mezi kontakty pomocí stopek. Cílem jednotlivých testů bylo udržet oblouk v ustáleném stavu po dobu 2 minut. Výstupem ze softwaru měřicího pracoviště pak byla průměrná hodnota proudu obloukem.

Hmotnostní úbytek byl vážen vahou Radwag AS 60/220.R2 s měřícím rozsahem 60/220 g a přesností 0,01/0,1 mg. Jednotlivé držáky s kontakty byly vždy zváženy před započítáním testování a pak po každém jednotlivém testu.

### 6.1.1 Naměřené a vypočtené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou odlišeny šedivou barvou buněk, vypočtené hodnoty jsou bílé.

Tabulka 6-1: Kontaktní dvojice AgWC-AgC 1. test

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
105	7,31	41,52	5610,791

Tabulka 6-2: Kontaktní dvojice AgWC-AgC 2. test

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
95	7,65	38,8	5559,638

Tabulka 6-3: Hmotnostní úbytky kontaktní dvojice AgWC-AgC

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt AgWC	164,4733	164,4715	0,0018	164,4703	0,0012	0,0030
Kontakt AgC	164,8166	164,8106	0,0060	164,8018	0,0088	0,0148
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,0078		0,0100	0,0178

Hmotnost kontaktů v tabulce je uvedena včetně držáků.

**Tabulka 6-4: Kontaktní dvojice AgW-AgC 1. test**

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
59	5,13	58,96	1552,697

**Tabulka 6-5: Kontaktní dvojice AgW-AgC 2. test**

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
120	6,25	50	4687,5

**Tabulka 6-6: Kontaktní dvojice AgW-AgC 3. test**

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
48	11,84	55,53	6728,909

**Tabulka 6-7: Kontaktní dvojice AgW-AgC 4. test**

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
100	11,83	55,61	13994,89

**Tabulka 6-8: Kontaktní dvojice AgC -AgW 4. test**

$t_a$	$I_{aavg}$	$U_a$	$I^2 t_a$
[s]	[A]	[V]	[A <sup>2</sup> s]
120	7,72	38,24	7151,808



Tabulka 6-9: Hmotnostní úbytky kontaktní dvojice AgW-AgC

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt AgW	164,284	164,2832	0,0008	164,2817	0,0015	164,2804	0,0013
Kontakt AgC	164,735	164,726	0,0090	164,7147	0,0113	164,7049	0,0098
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,0098		0,0128		0,0111
Kontakt	$m_4$	$\Delta m_4$	$m_5$	$\Delta m_5$	$\Delta m$		
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]		
Kontakt AgW	164,2791	0,0013	164,2784	0,0007	0,0056		
Kontakt AgC	164,6884	0,0165	164,6796	0,0088	0,0554		
Celkový úbytek kontaktního materiálu		0,0178		0,0095	0,0610		

Z důvodu výrobního tajemství dodavatele kontaktů není uvedeno poměrné zastoupení příměsí v jednotlivých kontaktech. Pro upřesnění lze dodat, že obsah uhlíku v kontaktu AgC pro první dvojici je nižší než obsah uhlíku v kontaktu pro druhou dvojici.



obr. 8: Nové kontakty před začátkem testování



**obr. 9: Kontaktní dvojice AgC-AgWC po testech (AgWC vlevo, AgC vpravo)**



**obr. 10: Kontaktní dvojice AgC-AgW po testech (AgW vlevo, AgC vpravo)**

Na obr. 9a obr. 10 jsou vidět kontakty po testech, na kontaktech AgC je v obou případech zřetelně viditelný úbytek materiálu, test tak potvrzuje, že materiál AgC je méně odolný erozi oproti materiálům AgW a AgWC. Na těch není úbytek tak viditelný, ale pohledem na tabulky s úbytky je zřejmé, že materiál AgW je z testovaných opravdu nejodolnějším a hmotnostní úbytek je nejmenší ze všech otestovaných kontaktů.



## 7 MĚŘENÍ NA REÁLNÝCH PŘÍSTROJÍCH

Měření na reálných přístrojích bylo provedeno na výkonových jističích Siemens řady 3VA. V obou případech šlo o výkonové jističe s omezujícími vlastnostmi při zkratu.

### 7.1 Testování jističe zkratem

První měření probíhalo na modelu 3VA s elektronickou spouští o parametrech:

$I_n = 250 \text{ A}$	(jmenovitý proud)
$I_r = 100 - 250 \text{ A}$	(nastavení nadproudové spouště)
$t_r = 1 - 15 \text{ s}$	(reakční doba)
$I_i = 375 - 2500 \text{ A}$	(nastavení zkratové spouště)

Při testování byl jistič nastaven na parametry:

$$I_r = 250 \text{ A}; t_r = 15 \text{ s}; I_i = 375 \text{ A}$$

Tento jistič jsme podrobili zkoušce zkratovým proudem o parametrech:

$$U = 245 \text{ V}; I = 6,24 \text{ kA}; f = 50 \text{ Hz}; \cos\varphi = 0,69; \text{úhel sepnutí } 60^\circ$$

Testování jističe probíhalo vždy jednofázově, jistič byl připojen mezi fází a střední vodič. Postupně byly změřeny všechny tři póly zkoušeného přístroje. Doba testu se pohybovala v rozmezí od 15 do 20 ms.

Hmotnostní úbytek byl opět vážen váhou Radwag AS 60/220.R2. Jistič jsem před testováním rozebral na jednotlivé kazety, ze kterých jsem vyjmul jednotlivé části kontaktního systému a každou z nich jsem zvážil. Kontaktní systém tohoto jističe se skládá ze dvou pevných kontaktů, z nichž jeden z nich slouží jako přívod, druhý je vyveden do prostoru spouště, kde probíhá vyhodnocení protékajícího proudu. Mezi tyto pevné kontakty je umístěn rotující pohyblivý kontakt, který slouží k propojení proudovodné dráhy přístroje.

Pevné kontakty jsou vyrobeny z materiálu stříbro-uhlík, který omezuje možnost svaření kontaktů. Pohyblivé jsou tvořeny kombinací stříbra a wolframu, který je dobře odolný vůči opotřebení. Procentní obsah jednotlivých příměsí ve stříbře je výrobním tajemstvím výrobce a není možné ho zjistit.

Ze softwaru zkušebního pracoviště jsem získal hodnoty proudu a napětí po dobu testu. Vzorkování hodnot probíhalo s frekvencí 50 kHz, což dává pro dobu testu 750-1000 hodnot, což považuji za dostatečný počet hodnot pro rekonstrukci průběhů veličin. Software rovněž měří čas hoření oblouku, z něhož počítá hodnoty Jouleova integrálu a obloukové energie. V těchto třech hodnotách jsem ale musel provést korekci, jelikož software vyhodnocuje dobu hoření oblouku jako čas od zahoření až do konce testu, tj. do času hoření se počítá i doba, kdy po odskoku kontaktů dojde k jejich opětovnému spojení v momentě, kdy proud prochází nulou a oblouk tedy nehoří. Doba, po kterou oblouk nehoří, jsem tedy odečetl a provedl korekci hodnoty Jouleova integrálu a obloukové energie. Na hodnotu Jouleova integrálu mělo toto zpřesnění velký vliv, jelikož jde o kvadratickou závislost na protékajícím proudu, hodnota obloukové energie se změnila jen nepatrně, protože napětí na kontaktech v sepnutém stavu se blíží nulové hodnotě.

Pro zpřesnění hodnot Jouleova integrálu a obloukové energie jsem použil numerickou metodu integrování, konkrétně lichoběžníkovou, kdy jsem integroval kvadrát protékajícího proudu v čase pro Jouleův integrál a součin napětí a proudu v čase pro obloukovou energii. Jako podmínku pro hoření oblouku jsem stanovil hodnotu napětí  $U_p$ , což je hodnota napětí mezi kontakty v čase  $t_p$ , kdy začíná hořet oblouk. Orientačně se tato hodnota při testování pohybovala okolo 10 V.

Kontakty pro fáze L1 (1 a 2) a L3 (5 a 6) jsme testovali celkem třikrát, kontakt fáze L2 (3 a 4) dvakrát.

### 7.1.1 Naměřené a vypočtené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou odlišeny šedivou barvou buněk, vypočtené hodnoty jsou bílé.

**Tabulka 7-1: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,38	20,32	7,9	12,82	22,7	11,06	471,97	4,68	15,4	389,27	4,53	5,03	135,99

#### 7.1.1.1 Výpočty

$$t_{askut} = t_t - t_p - (t_{a2} - t_{a1}) \quad (\text{ms; ms; ms; ms; ms}) \quad (11)$$

$$t_{askut} = 22,7 - 2,38 - (12,82 - 7,9) = \underline{\underline{15,4 \text{ ms}}}$$

$$I^2 t = \int_{t_p}^{t_{a1}} I_a^2(t) dt + \int_{t_{a2}}^{t_t} I_a^2(t) dt \quad (\text{A}^2\text{s; A}) \quad (12)$$

výpočet proběhl numerickou integrací z naměřených hodnot

$$W_a = \int_{t_p}^{t_{a1}} U_a(t) \cdot I_a(t) dt + \int_{t_{a2}}^{t_t} U_a(t) \cdot I_a(t) dt \quad (\text{J; V; A}) \quad (13)$$

výpočet proběhl numerickou integrací z naměřených hodnot

$$I_{aef} = \sqrt{\frac{1}{t_{askut}} \int_{t_p}^{t_{a1}} I_a^2(t) dt + \int_{t_{a2}}^{t_t} I_a^2(t) dt} \quad (\text{J; V; A}) \quad (14)$$

výpočet proběhl numerickou integrací z naměřených hodnot

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{t_{askut}} \int_0^{t_{askut}} U_a^2(t) dt} \quad (\text{J; V; A}) \quad (15)$$

výpočet proběhl numerickou integrací z naměřených hodnot

Tabulka 7-2: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 2. test

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,16	16,5	7,24	12,6	18,66	11,25	450,21	4,12	11,14	374,89	3,98	5,80	67,67

Tabulka 7-3: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 3. test

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
1,44	17,06	7,42	8,06	18,5	10,06	406,75	4,32	16,42	403,88	4,31	4,96	55,85

Tabulka 7-4: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (1)	37,9245	37,6983	0,2263	37,4844	0,2139	37,2172	0,2671	0,70730
Kontakt do zátěže (2)	52,8798	52,6253	0,2544	52,3577	0,2676	52,1670	0,1907	0,71274
Pohyblivý kontakt	31,1975	30,2132	0,9843	29,1858	1,0275	27,6161	1,5697	3,58144
Celkový úbytek kontaktního materiálu			1,4650		1,5090		2,0275	5,00148

Hmotnost kontaktů v tabulce je uvedena včetně nosičů.

Tabulka 7-5: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 1. test

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,08	14	8,16	10,96	16,08	11,13	387,67	7,30	11,2	371,12	7,27	5,76	192,09

Tabulka 7-6: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 2. test

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
1,3	14,58	7,92	11,08	15,88	11,88	397,25	7,57	11,42	375,35	7,51	5,74	197,85

Tabulka 7-7: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L2

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (3)	37,8819	37,7091	0,1728	37,5469	0,1622	0,3350
Kontakt do zátěže (4)	52,9608	52,7416	0,2192	52,5308	0,2108	0,4300
Pohyblivý kontakt	31,2266	30,5212	0,7054	29,8640	0,6572	1,3626
Celkový úbytek kontaktního materiálu			1,0974		1,0302	2,1276

**Tabulka 7-8: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 1. test**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,02	13,94	8,18	10,6	15,96	11,88	387,06	7,19	11,52	377,17	7,15	5,73	190,72

**Tabulka 7-9: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 2. test**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,28	13,48	8,06	10,92	15,76	13,50	371,68	7,43	10,62	355,70	7,39	5,79	207,57

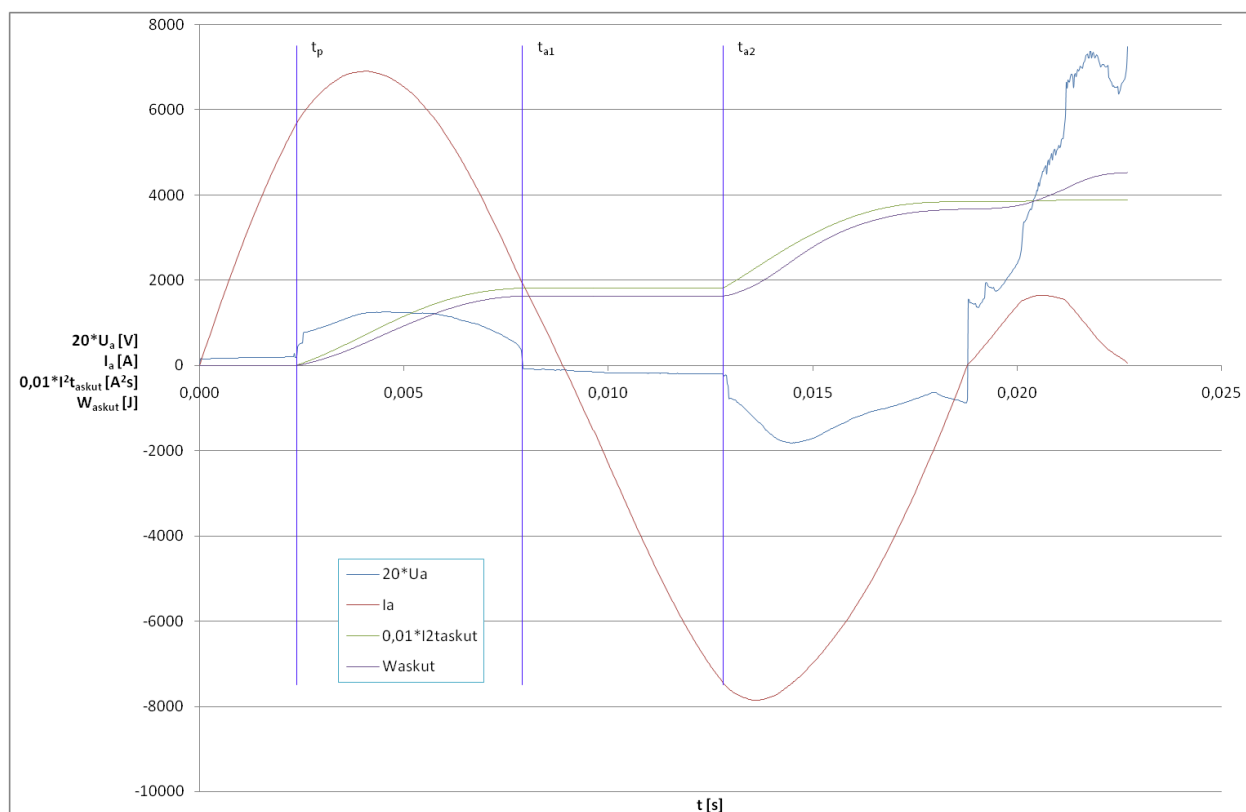
**Tabulka 7-10: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 3. test**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
2,2	13,1	7,68	11,04	15,3	13,06	370,19	7,34	9,74	347,79	7,27	5,98	218,70

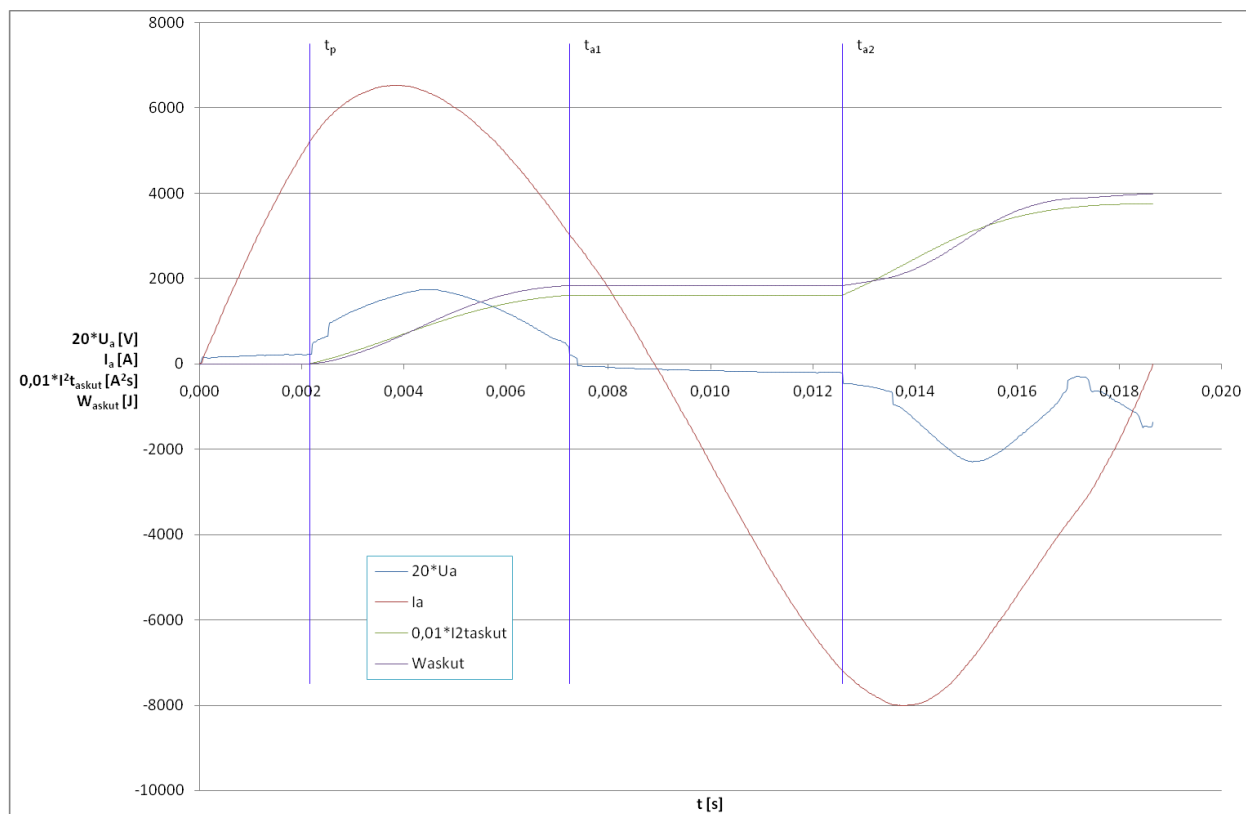
**Tabulka 7-11: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L3**

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (5)	37,8096	37,6597	0,1500	37,5111	0,1486	37,3647	0,1464	0,4449
Kontakt do zátěže (6)	52,9466	52,7828	0,1638	52,5719	0,2109	52,4003	0,1716	0,5463
Pohyblivý kontakt	30,7442	30,1863	0,5579	29,5302	0,6561	28,8230	0,7072	1,9212
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,8717		1,0156		1,0252	2,9125

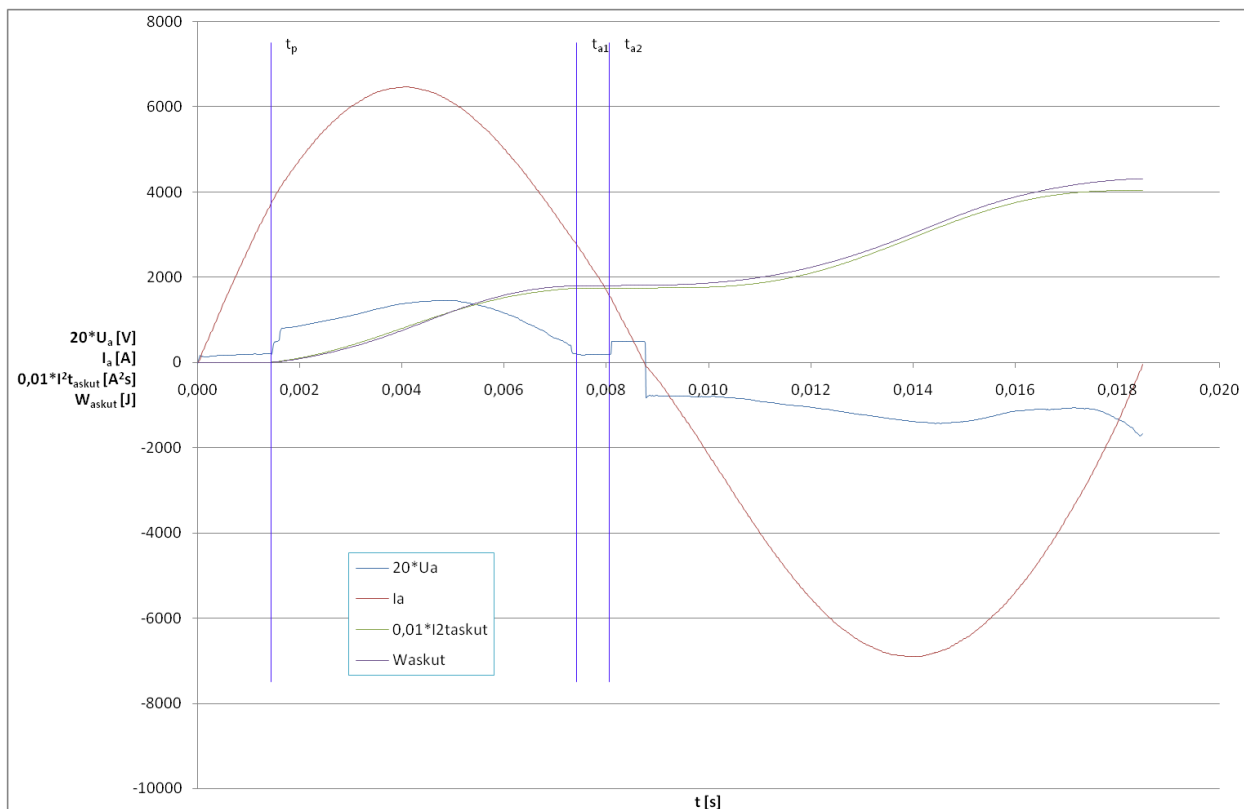
## 7.1.2 Průběhy veličin při testování



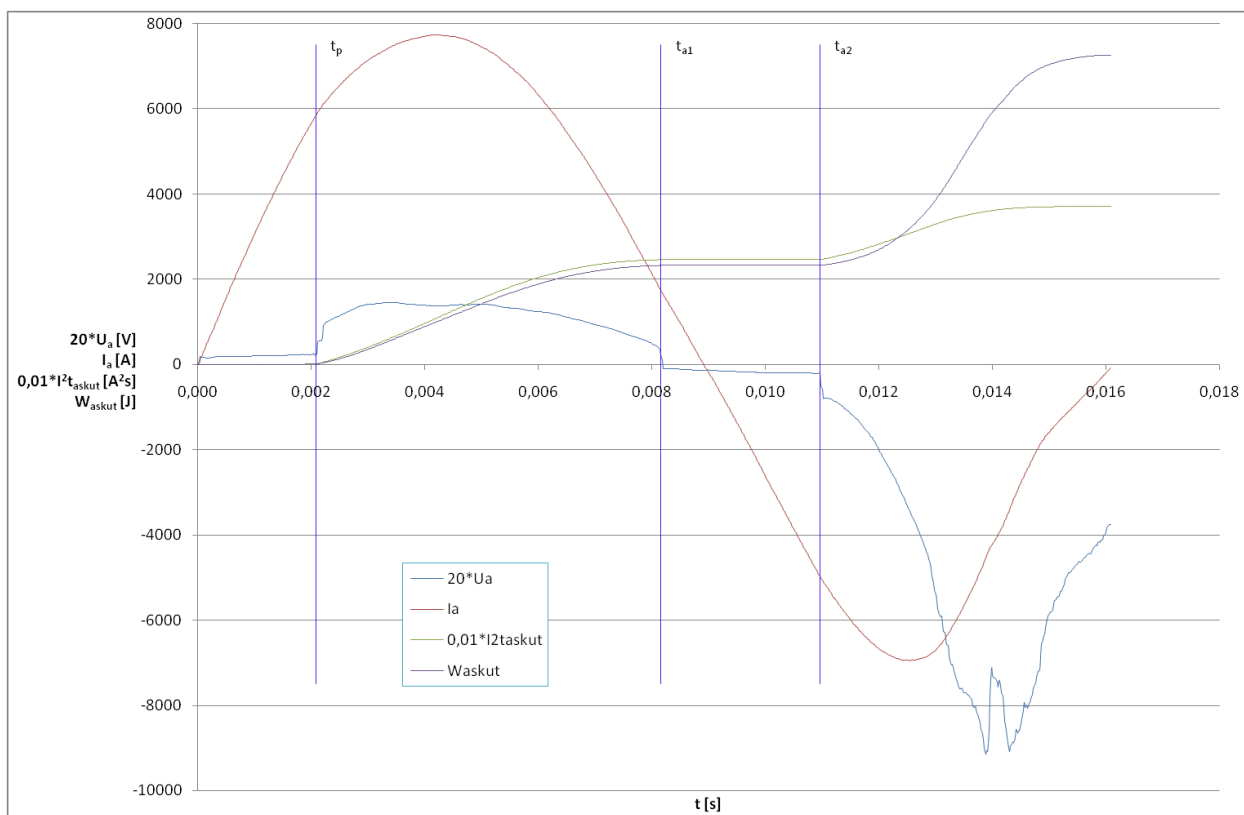
obr. 11: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test



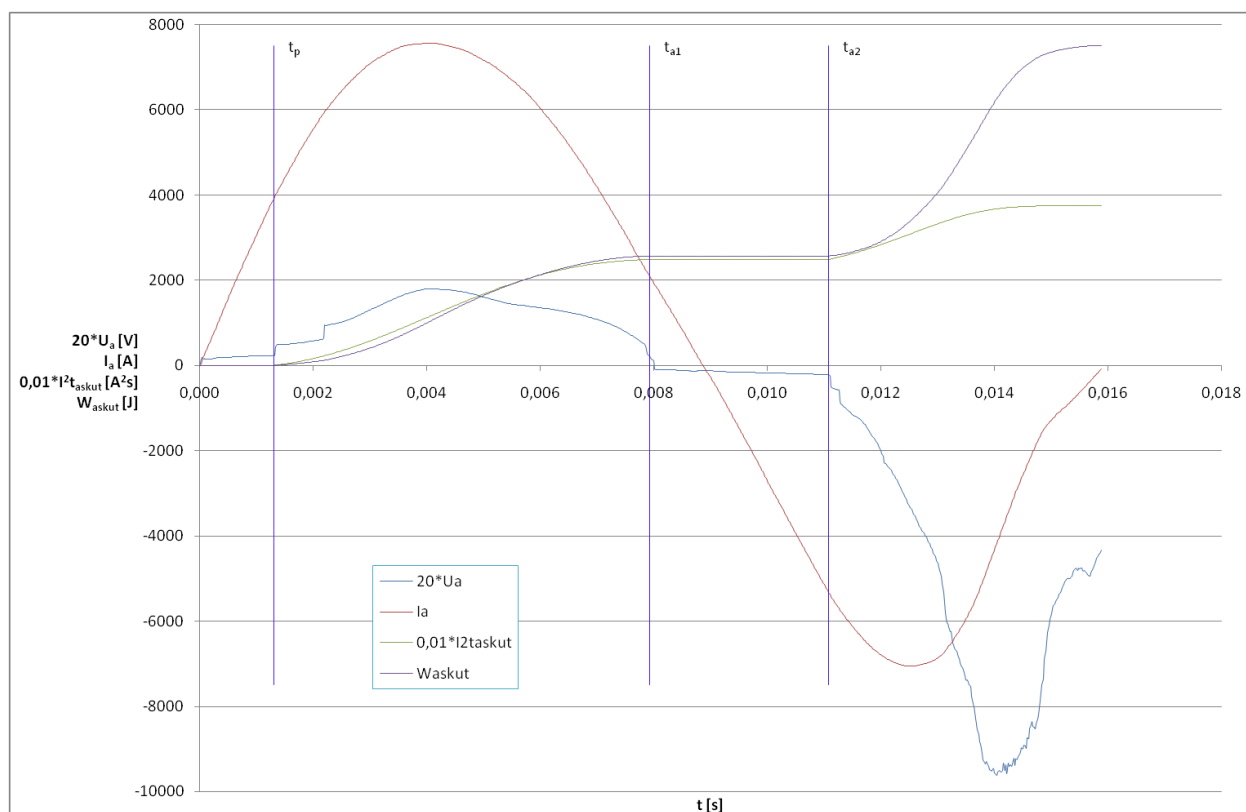
obr. 12: Fáze L1 (1 a 2) - 2. test



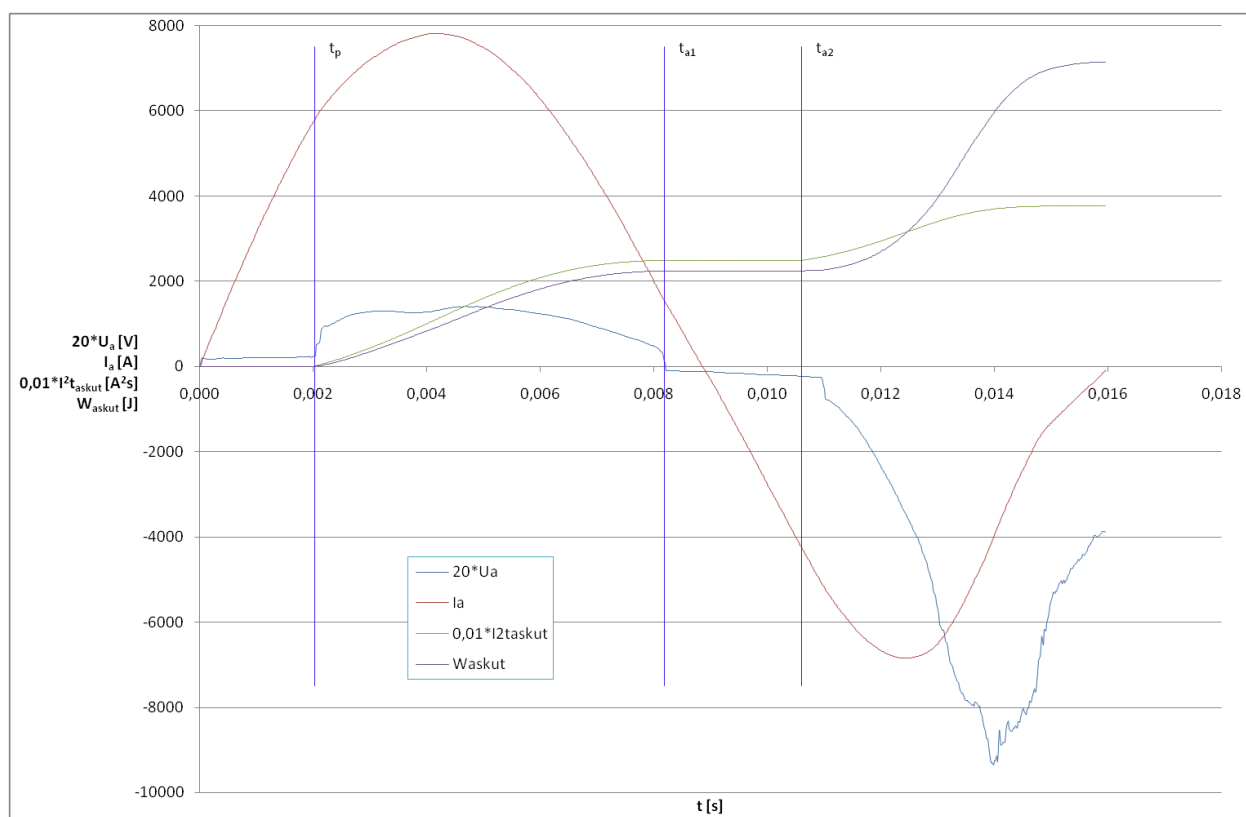
obr. 13: Fáze L1 (1 a 2) - 3. test



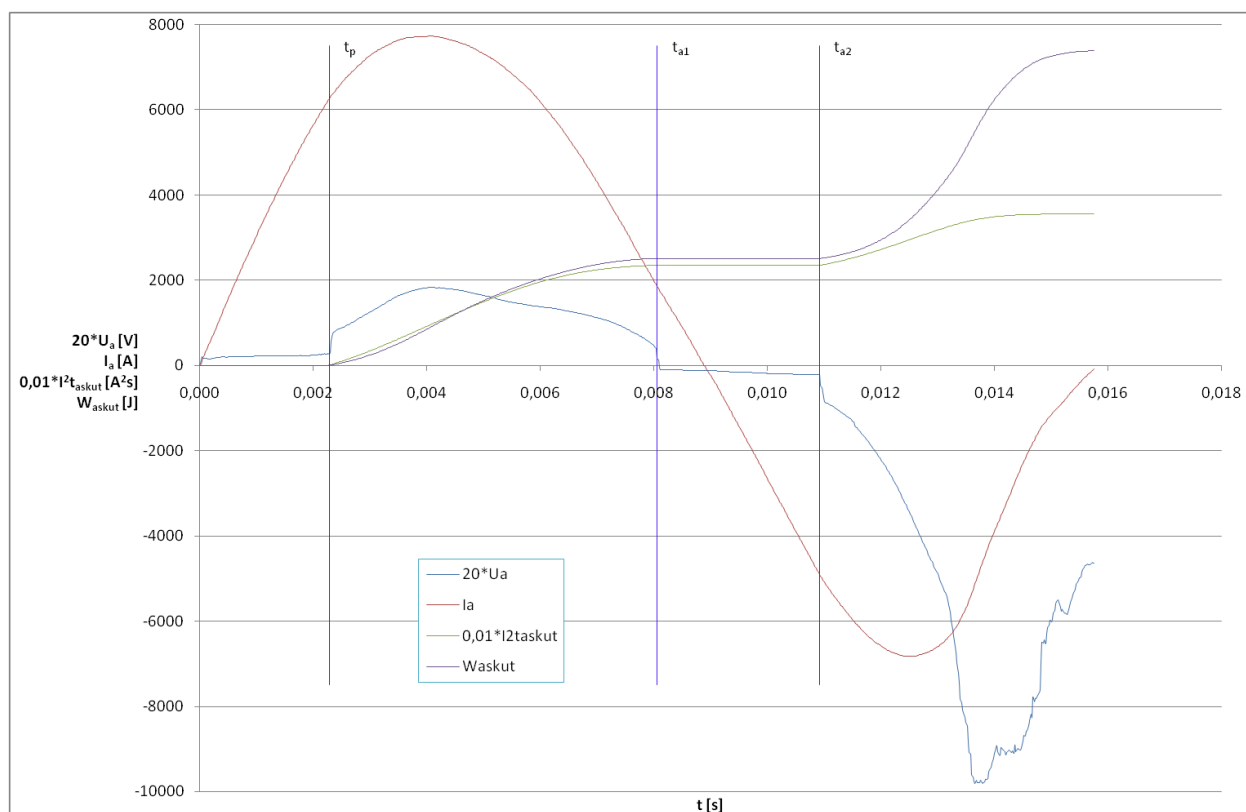
obr. 14: Fáze L2 (3 a 4) - 1. test



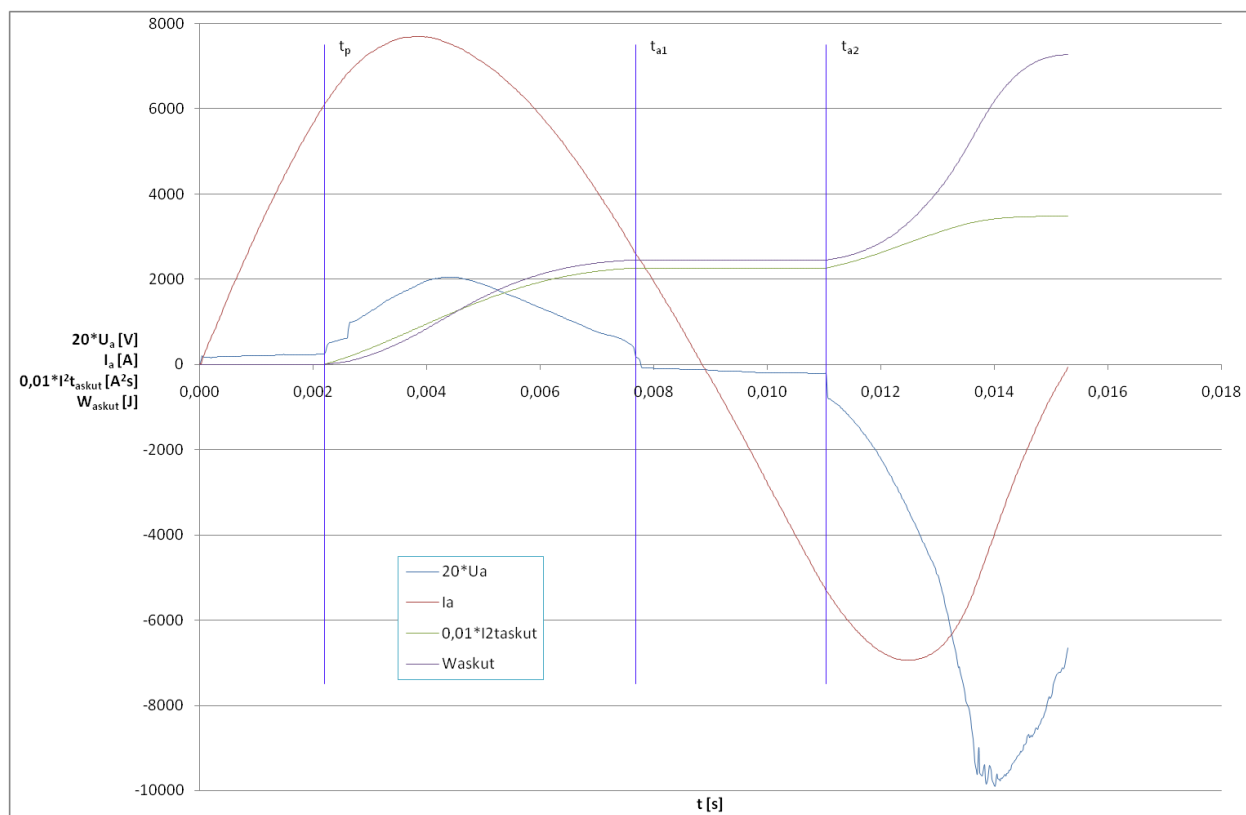
obr. 15: Fáze L2 (3 a 4) - 2. test



obr. 16: Fáze L3 (5 a 6) - 1. test

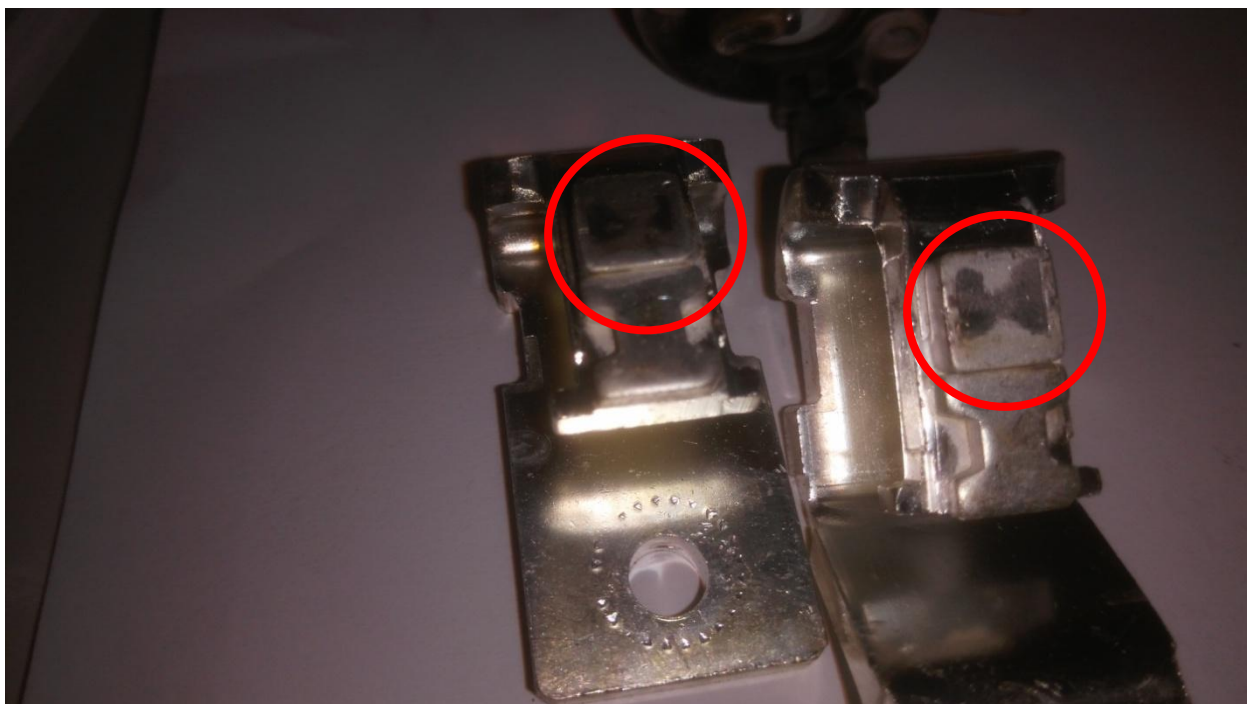


obr. 17: Fáze L3 (5 a 6) - 2. test



obr. 18: Fáze L3 (5 a 6) - 3. test





obr. 19: Nové pevné kontakty jističe před začátkem testování



obr. 20: Nový pohyblivý kontakt jističe před testováním



obr. 21: Kontakty fáze L1 jističe po skončení testování



obr. 22: Detail pohyblivého kontaktu L1



**obr. 23: Kontakty fáze L2 jističe po skončení testování**



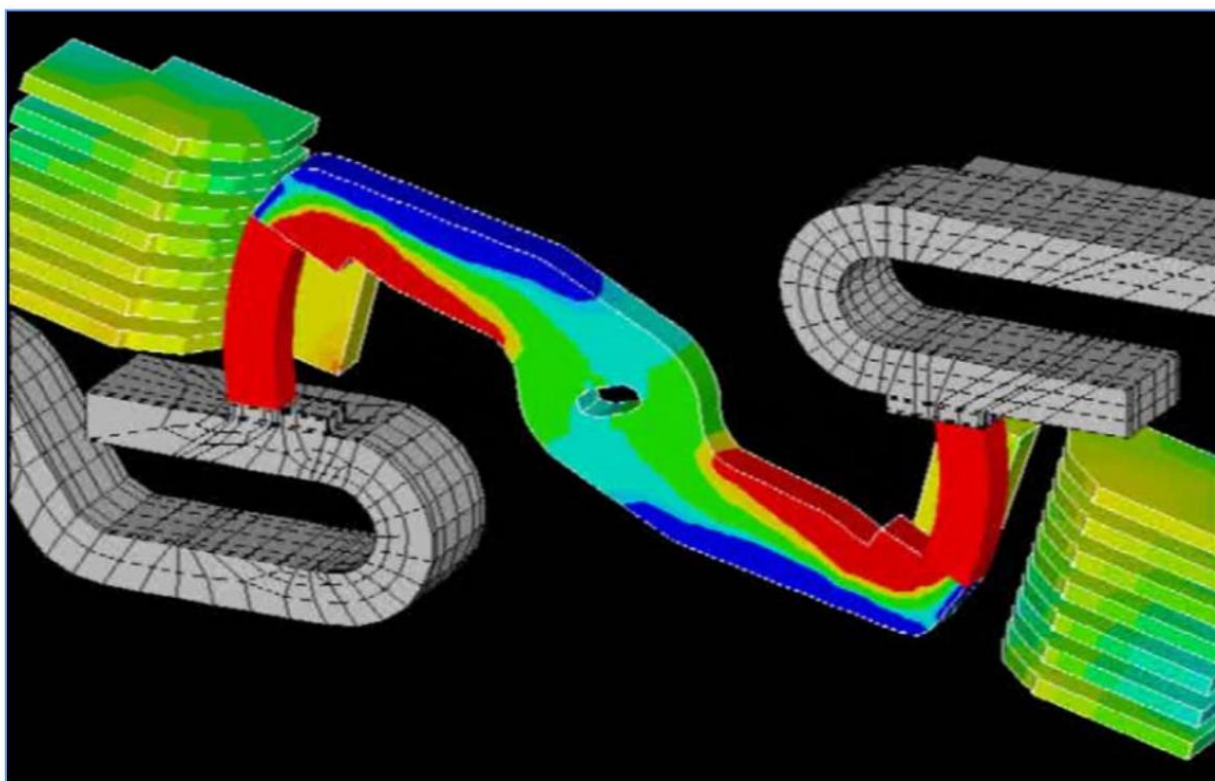
**obr. 24: Kontakty fáze L3 jističe po skončení testování**

Výše na obr. 19 a obr. 20 je možno vidět kontakty testovaného přístroje před zahájením testu. Kontaktní plochy jsou vyznačeny červeně, na obr. 21, obr. 22, obr. 23 a obr. 24 je pak vidět jak vypadají kontakty po 3 cyklech pro fáze L1 a L3, resp. po 2 cyklech pro fázi L2.

Kontaktní materiál ubýval při testování velmi rychle, kontakty fáze L1 se dokonce zcela odpařili do prostoru mimo kontakty a na nosičích nezbylo nic, na fotografiích pevných kontaktů to vzhledem k množství sazí není úplně zřejmé, ale při pohledu na pohyblivý kontakt je patrné, že kontaktní plocha je zcela pryč. Výsledkem tohoto testu je tak i určení hmotnosti kontaktů zkoušeného přístroje, tyto hmotnosti odpovídají celkovým úbytkům  $\Delta m$

z Tabulka 7-4 nahoře, tj. cca 0,7g kontaktního materiálu pro pevné kontakty a 1,8g pro každou stranu pohyblivého kontaktu.

Z testu je patrné, že k největšímu úbytku dochází na pohyblivých kontaktech. Držák těchto kontaktů nemá takový průřez, jako držák pevných kontaktů a při vypínání se ohřeje na větší teplotu než pevný kontakt. Ačkoliv je tedy pohyblivý kontakt vyroben z materiálu odolnějšího vůči opotřebení, tak v důsledku působení vyšších teplot je hmotnostní úbytek na jeden cyklus zhruba dvakrát takový, než úbytek na pevném kontaktu. To, že jsou kontaktní plochy pohyblivého kontaktu nejteplejším místem při vypínání ukazuje i prezentace jističů od společnosti Eaton [6], viz obr. 25, kde je zobrazeno rozložení teplot na kontaktním systému, který je totožný se systémem, který používá testovaný jistič.



obr. 25: Rozložení teplot na kontaktech při vypínacím cyklu [6]

## 7.2 Testování jističe nadproudem

Pro účely testování eroze kontaktů nadproudem byl použit opět přístroj z řady 3VA s tepelnou spouští o jmenovitých hodnotách:

$I_n = 250 \text{ A}$	(jmenovitý proud)
$I_r = 175 - 250 \text{ A}$	(nastavení nadproudové spouště)
$t_r = 1 \text{ s}$	(reakční doba)
$I_i = 1250 - 2500 \text{ A}$	(nastavení zkratové spouště)

Při testování byl jistič nastaven na parametry:

$$I_r = 250 \text{ A}; I_i = 1750 \text{ A}$$

Tento jistič jsme podrobili dvěma typům testů zkoušky o různých hodnotách napětí a proudů:

- $U = 250 \text{ V}$ ;  $I = 1,904 \text{ kA}$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $\cos\varphi = 0,52$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$
- $U = 752 \text{ V}$ ;  $I = 1,55 \text{ kA}$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $\cos\varphi = 0,5$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$

Testy byly prováděny opět jednofázově a pouze na kontaktech fází L1 a L3. 1. typ testu byl proveden ve 3 etapách, kdy nejprve jsme provedli 1 cyklus, poté 6 cyklů a nakonec 25 cyklů v řadě.

2. typ testu byl proveden také ve 3 etapách po 10, 30 a 50 cyklech. Po skončení jednotlivých etap testování vždy došlo k převážení kontaktů.

Kontaktní systém je obdobou systému předchozího testovaného přístroje, tedy sestava 2 pevných kontaktů a jednoho rotačního.

Stejně tak materiál použitý pro kontakty je tvořen stejnými slinutinami, tj. stříbro-wolfram pro pevné a stříbro-uhlík pro pohyblivé.

Hodnoty měření získané ze softwaru měřicího pracoviště byly tentokrát mnohem přesnější, neboť oblouk hořel jen v jedné půlperiodě a tedy nepřerušovaně.

### 7.2.1 Naměřené a vypočtené hodnoty

Vzhledem k enormnímu počtu hodnot získaných z měření (celkem proběhlo 244 testů) jsou níže zpracované jen některé, jelikož průběh testů byl vždy pro danou etapu v podstatě totožný.

Hodnoty hmotnostních úbytků jsou pak zpracovány pro všechna měření tak, jak jsou chronologicky seřazené výše ve výčtu testů.

Naměřené hodnoty jsou odlišeny šedivou barvou buněk, vypočtené hodnoty jsou bílé.

**Tabulka 7-12: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test (1. typ testu, 1 cyklus)**

$t_p$	$t_a$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
10,7	5,7	16,4	5,00	6,75	1,26	5,7	6,76	1,26	1,09	240,94

**Tabulka 7-13: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)**

$t_p$	$t_a$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
128,1	3,7	131,8	2,31	7,86	0,51	3,7	7,63	0,51	1,44	168,44

**Tabulka 7-14: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)**

$t_p$	$t_a$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
128,2	3,6	131,8	2,69	7,45	0,47	3,6	7,31	0,47	1,43	169,43

**Tabulka 7-15: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1**

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (1)	21,2082	21,2081	0,0001	21,2073	0,0008	21,2038	0,0035
Kontakt do zátěže (2)	40,4307	40,4304	0,0002	40,4293	0,0011	40,4245	0,0048
Pohyblivý kontakt	33,6590	33,6366	0,0224	33,5314	0,1052	33,5544	-0,0230
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,0227		0,1071		-0,0148
Kontakt	$m_4$	$\Delta m_4$	$m_5$	$\Delta m_5$	$m_6$	$\Delta m_6$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (1)	21,1861	0,0211	21,1740	0,0121	21,1530	0,0210	0,0552
Kontakt do zátěže (2)	40,4145	0,0148	40,4031	0,0114	40,3875	0,0156	0,0432
Pohyblivý kontakt	33,5389	-0,0075	33,5161	0,0228	33,4756	0,0405	0,1834
Celkový úbytek kontaktního materiálu		0,0284		0,0464		0,0771	0,2818

**Tabulka 7-16: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)**

$t_p$	$t_a$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
127,56	4,06	131,62	1,44	9,76	0,68	4,06	9,81	0,67	1,62	173,38

**Tabulka 7-17: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)**

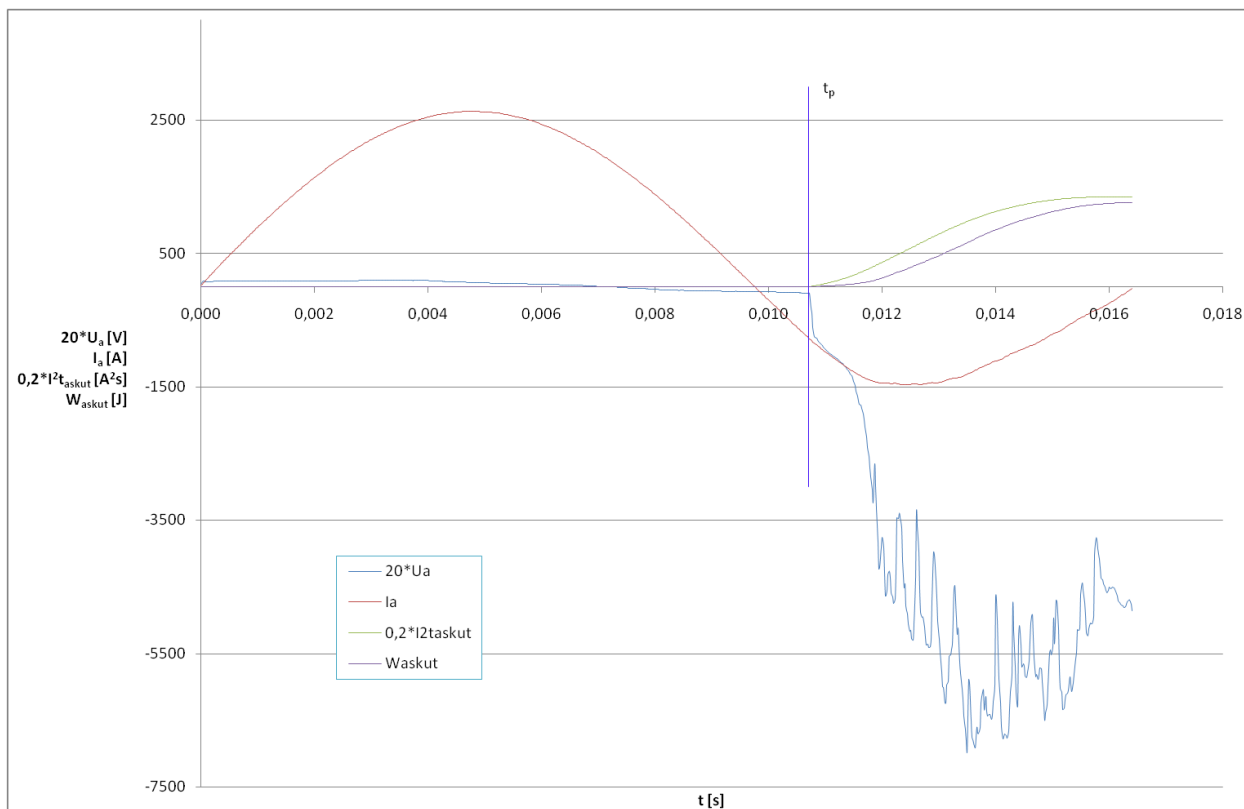
$t_p$	$t_a$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
128,2	3,66	131,86	1,38	7,90	0,52	3,66	7,67	0,52	1,45	173,74

**Tabulka 7-18: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1**

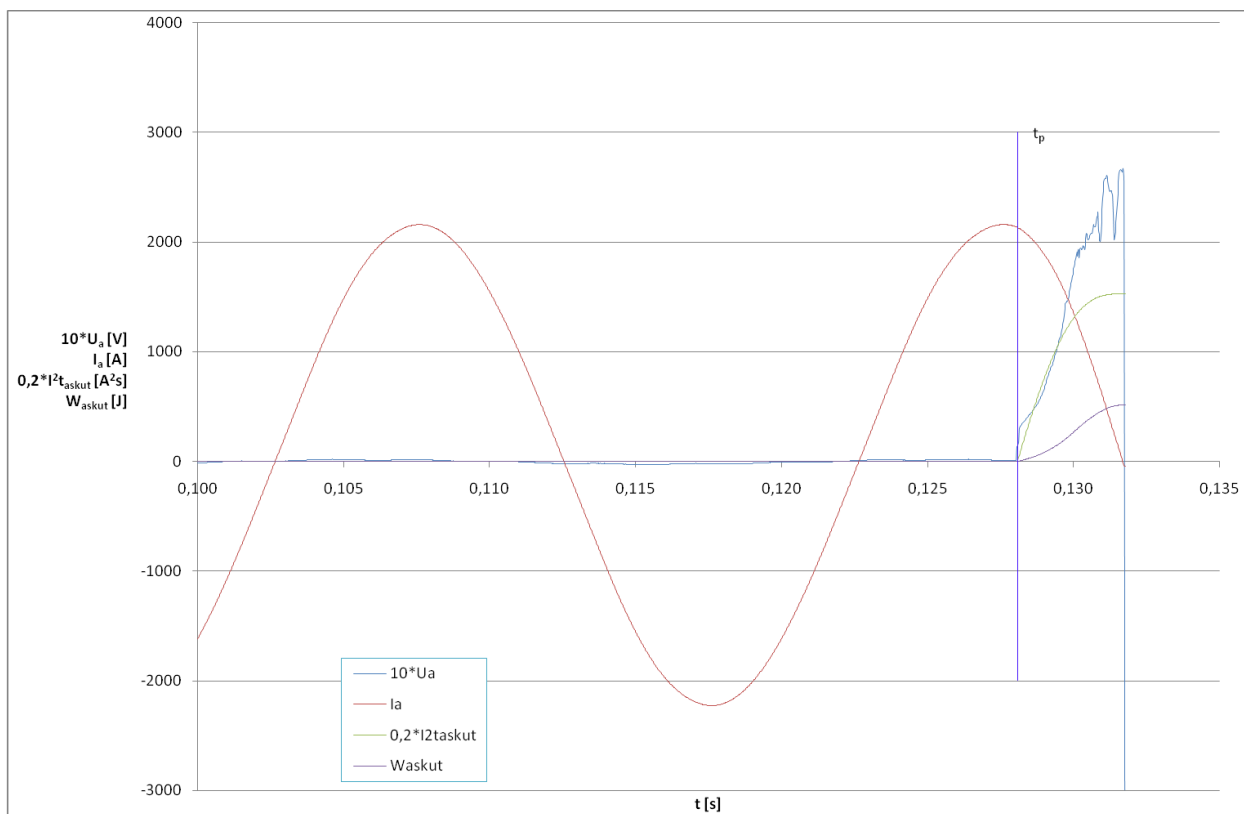
Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (5)	21,2044	21,2049	-0,0004	21,2048	0,0001	21,2001	0,0047
Kontakt do zátěže (6)	40,4470	40,4480	-0,0010	40,4465	0,0015	40,4328	0,0138
Pohyblivý kontakt	32,7955	32,7813	0,0142	32,7587	0,0226	32,6814	0,0773
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,0127		0,0241		0,0958
Kontakt	$m_4$	$\Delta m_4$	$m_5$	$\Delta m_5$	$m_6$	$\Delta m_6$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (5)	21,1957	0,0091	21,1841	0,0116	21,1594	0,0247	0,0450
Kontakt do zátěže (6)	40,4308	0,0157	40,4232	0,0076	40,4059	0,0174	0,0411
Pohyblivý kontakt	32,6897	0,0690	32,6780	0,0117	32,6365	0,0415	0,1590
Celkový úbytek kontaktního materiálu		0,0938		0,0308		0,0836	0,2451



## 7.2.2 Průběhy veličin při testování

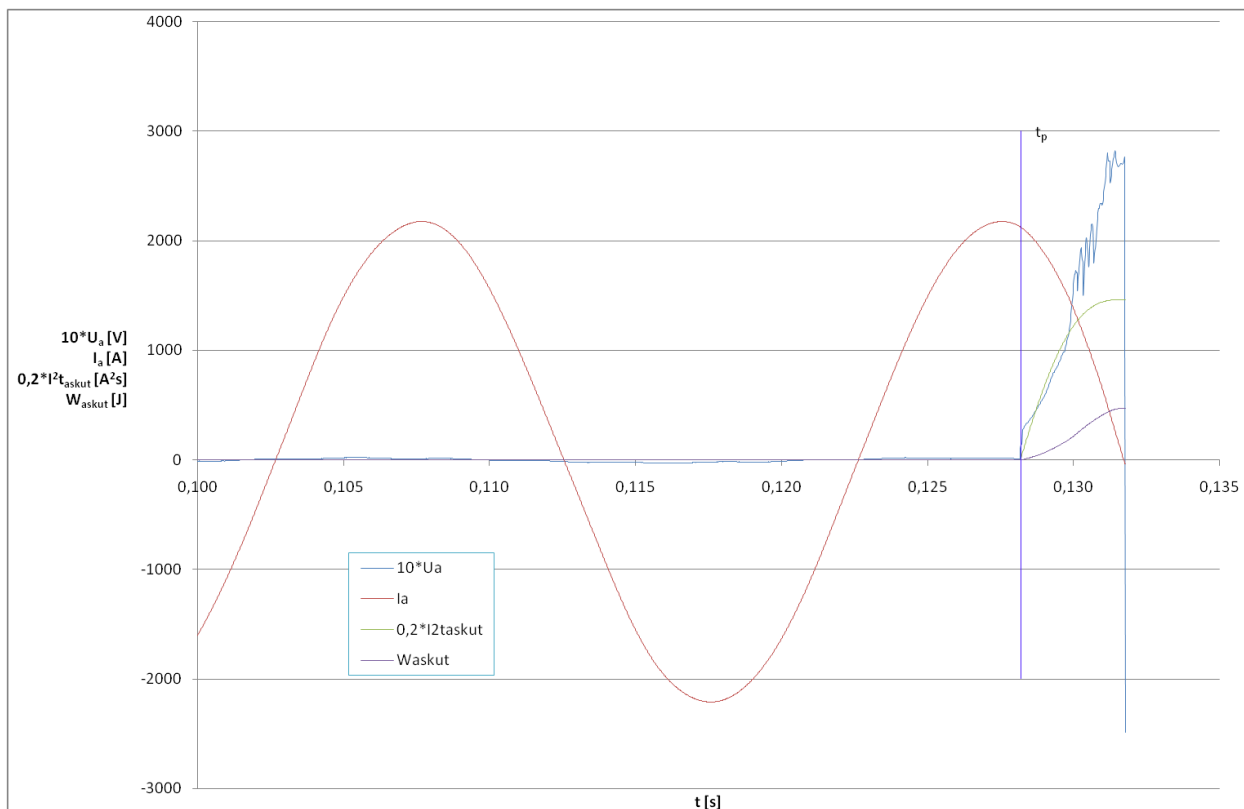


obr. 26: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test (1. typ testu, 25 cyklů)

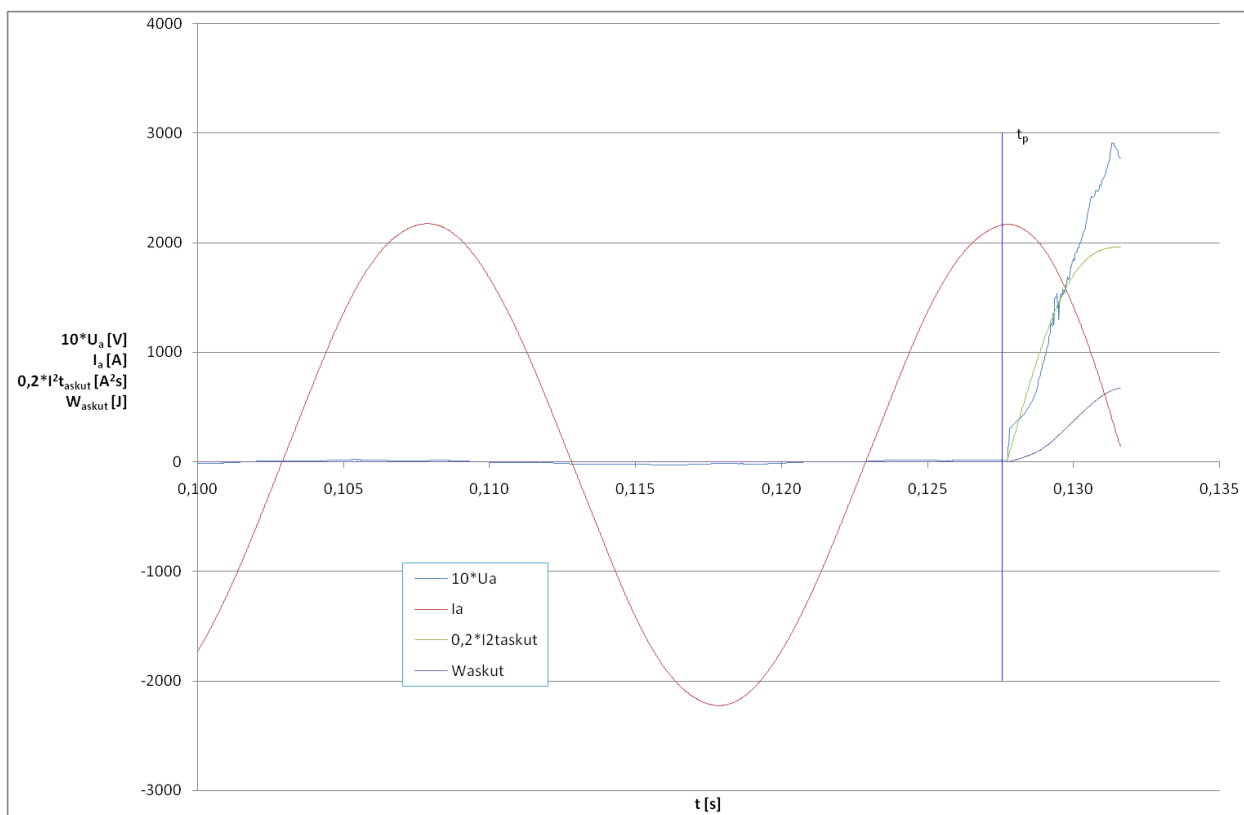


obr. 27: Fáze L1 (1 a 2) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)

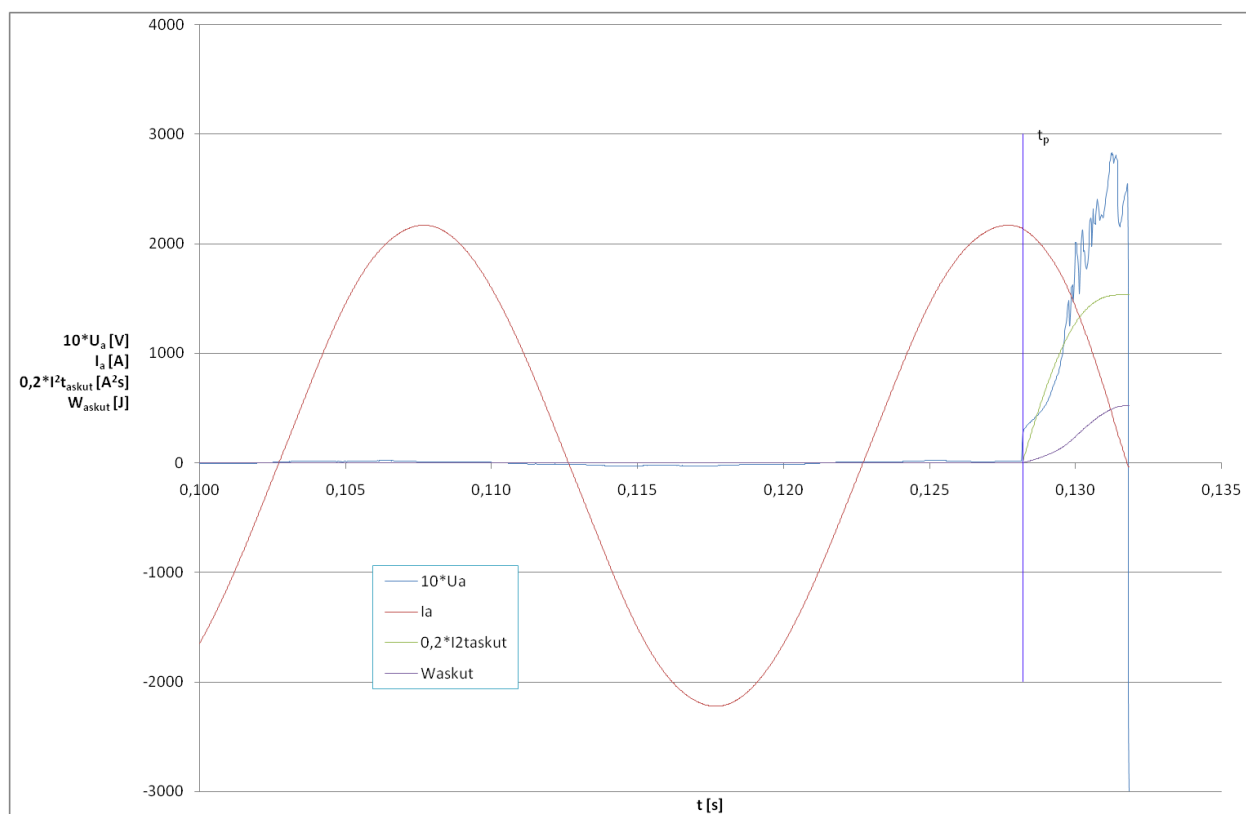




obr. 28: Fáze L1 (1 a 2) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)



obr. 29: Fáze L3 (5 a 6) - 5. test (2. typ testu, 30 cyklů)



obr. 30: Fáze L3 (5 a 6) - 6. test (2. typ testu, 50 cyklů)



**obr. 31: Nové pevné kontakty jističe 3VA**



**obr. 32: Nový pohyblivý kontakt jističe 3VA**



**obr. 33: Kontakty fáze L1 jističe 3VA po posledním testu nadproudem**



**obr. 34: Kontakty fáze L3 jističe po posledním testu nadproudem**

Na obr. 31 a obr. 32 je možno vidět nové kontakty druhého testovaného jističe 3VA před začátkem testování. Na obr. 33 a obr. 34 jsou pak vidět kontakty po skončení testů.

Z obrázků je patrné, že kontakty nedoznaly příliš velkých změn. Úbytek pevných kontaktů je v řádech setin gramu a to i přes vysoký počet testovacích cyklů (122 cyklů pro každou testovanou fázi). Úbytek pohyblivých kontaktů se pohybuje v řádu desetin gramu a je zde znát, že tvar kontaktu je zdeformovaný. Tuto deformaci opět připisují vyšším teplotám působícím na konstrukci pohyblivého kontaktu i na kontakt samotný. Nicméně tato deformace není nijak výrazná.

Z naměřených hodnot dokonce vyplývá, že v některých případech je hmotnost kontaktu po testu vyšší, než před testem. Vždy to však platí buď jen pro pevné kontakty, nebo pro kontakt pohyblivý, nikdy pro oboje kontakty najednou. Z toho je patrné, že při vypínání se materiál přenáší i mezi kontakty a není obloukem unášen mimo kontaktní plochy.

## 7.3 Testování jističe zkratem

Po otestování druhého jističe nadproudem jsme ještě přistoupili k dalším testům zkratovými proudy:

- Fáze L1  
 $U = 430 \text{ V}; I = 4,4 \text{ kA}; f = 50 \text{ Hz}; \cos\varphi = 0,59$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$   
 $U = 245 \text{ V}; I = 16,89 \text{ kA}; f = 50 \text{ Hz}; \cos\varphi = 0,22$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$
- Fáze L2  
 $U = 245 \text{ V}; I = 16,89 \text{ kA}; f = 50 \text{ Hz}; \cos\varphi = 0,22$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$
- Fáze L3  
 $U = 730 \text{ V}; I = 4,43 \text{ kA}; f = 50 \text{ Hz}; \cos\varphi = 0,64$ ; úhel sepnutí  $60^\circ$

Nejprve jsme na fázích L1 a L3 vyzkoušeli, jak ubývají kontakty při stejných proudech, ale různých napětích (430 V pro fázi L1 a 730 V pro fázi L3). Poté jsme ještě na fázi L1 a L2 zkoušeli vysoký zkratový proud při napětí 245V.

### 7.3.1 Naměřené a vypočtené hodnoty

Naměřené hodnoty jsou odlišeny šedivou barvou buněk, vypočtené hodnoty jsou bílé.

Tabulka 7-19: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 1. test ( $U = 430 \text{ V}; I = 4,4 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
9,84	8,12	17,96	4,69	91,66	5,18	8,12	91,73	5,18	3,36	202,02	9,84	8,12

Tabulka 7-20: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 2. test ( $U = 430 \text{ V}; I = 4,4 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
9,68	7,9	17,58	7,06	68,87	5,27	7,9	68,87	5,27	2,95	241,94	9,68	7,9

Tabulka 7-21: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 3. test ( $U = 430 \text{ V}; I = 4,4 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
9,6	7,88	17,48	17,06	59,58	5,17	7,88	59,58	5,17	2,75	253,60	9,6	7,88

**Tabulka 7-22: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 4. test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
0,48	6,76	7,24	16,81	532,72	12,48	6,76	532,63	12,48	8,88	233,26	0,48	6,76

**Tabulka 7-23: Kontakty fáze L1 (1 a 2) - 5. test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )**

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
0,6	6,44	7,04	14,13	594,98	13,10	6,44	595,37	13,10	9,61	245,54	0,6	6,44

**Tabulka 7-24: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L1**

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (1)	21,1529	21,0141	0,1388	20,9556	0,0585	20,9432	0,0124
Kontakt do zátěže (2)	40,3872	40,2115	0,1757	40,1707	0,0408	40,1509	0,0197
Pohyblivý kontakt	33,4772	33,1560	0,3211	33,0352	0,1208	32,9901	0,0451
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,6357		0,2201		0,0773
Kontakt	$m_4$	$\Delta m_4$	$m_5$	$\Delta m_5$	$\Delta m$		
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]		
Kontakt přívodu (1)	20,8762	0,0670	20,7865	0,0897	0,3664		
Kontakt do zátěže (2)	40,0772	0,0737	39,9824	0,0948	0,4049		
Pohyblivý kontakt	32,5122	0,4779	32,0863	0,4259	1,3908		
Celkový úbytek kontaktního materiálu		0,6187		0,6104	2,1621		

Tabulka 7-25: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 1. Test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
1,04	6,2	7,24	15,00	538,93	12,79	6,2	540,16	12,79	9,33	247,02	1,04	6,2

Tabulka 7-26: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 2. Test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
0,58	6,8	7,38	15,56	588,73	13,14	6,8	588,84	13,14	9,30	232,51	0,58	6,8

Tabulka 7-27: Kontakty fáze L2 (3 a 4) - 3. Test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
0,58	6,8	7,38	15,56	588,73	13,14	6,8	588,84	13,14	9,30	232,51	0,58	6,8

Tabulka 7-28: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L2

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m_1$	$m_2$	$\Delta m_2$	$m_3$	$\Delta m_3$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (5)	20,8805	21,1547	-0,2743	21,0930	0,0617	20,9623	0,1307	-0,0818
Kontakt do zátěže (6)	40,3909	40,3491	0,0417	40,2596	0,0895	40,1619	0,0978	0,2290
Pohyblivý kontakt	33,6254	33,1959	0,4295	32,7350	0,4609	32,2522	0,4827	1,3732
Celkový úbytek kontaktního materiálu			0,1970		0,6121		0,7112	1,5203

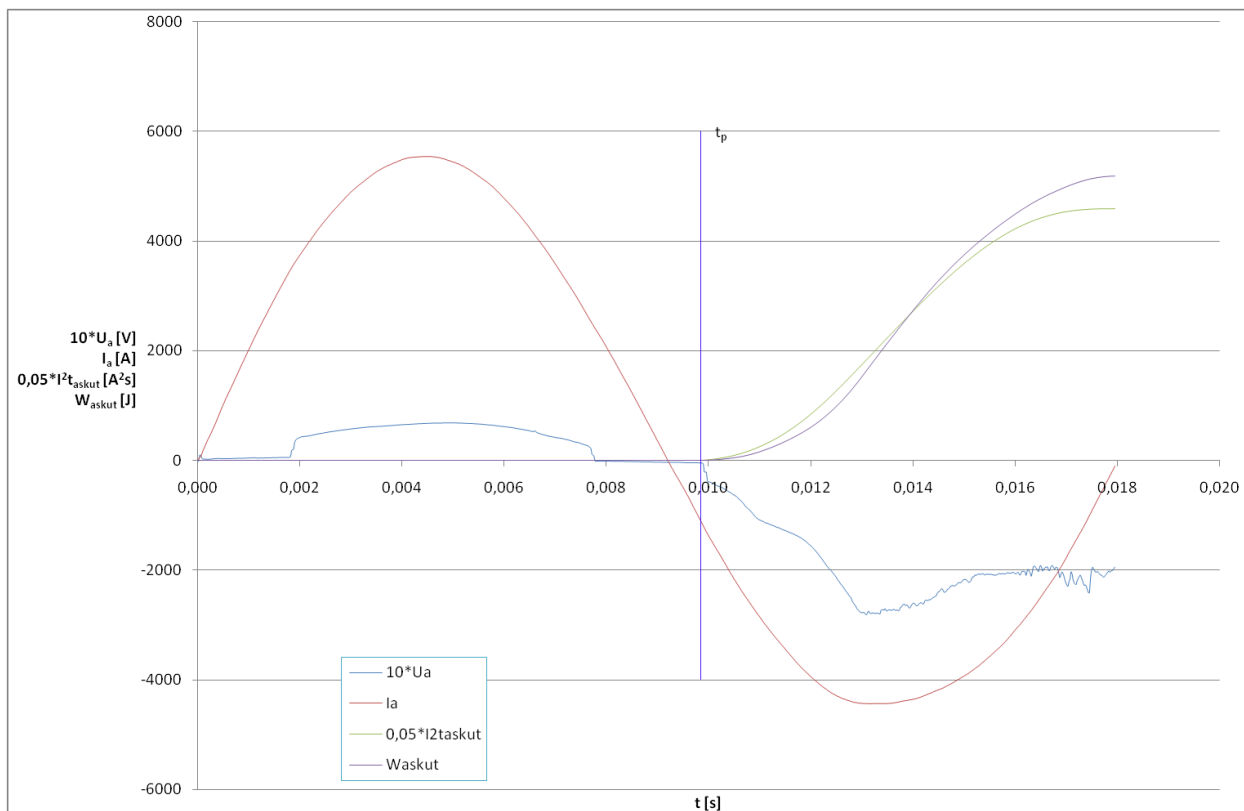
Tabulka 7-29: Kontakty fáze L3 (5 a 6) - 1. Test ( $U = 730 \text{ V}$ ;  $I = 4,43 \text{ kA}$ )

$t_p$	$t_a$	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_t$	$U_p$	$I^2 t_a$	$W_a$	$t_{askut}$	$I^2 t_{askut}$	$W_{askut}$	$I_{aef}$	$U_{aef}$
[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[ms]	[kA <sup>2</sup> s]	[kJ]	[kA]	[V]
10,12	28,34	38,46	35,63	361,80	24,86	28,34	361,76	21,86	3,57	240,47	10,12	28,34

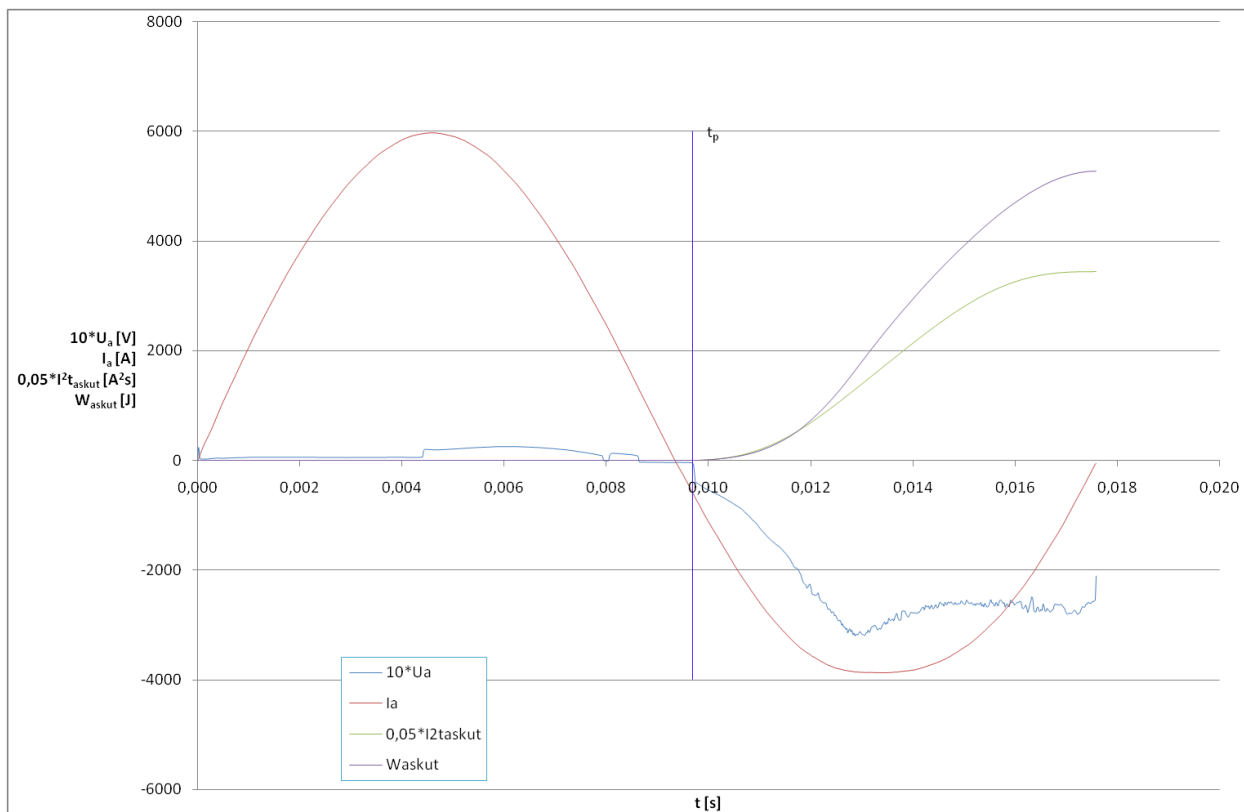
Tabulka 7-30: Hmotnostní úbytky kontaktů fáze L3

Kontakt	$m_0$	$m_1$	$\Delta m$
	[g]	[g]	[g]
Kontakt přívodu (5)	21,1594	20,7961	0,3633
Kontakt do zátěže (6)	40,4056	40,0840	0,3216
Pohyblivý kontakt	32,5918	31,9607	0,6311
Celkový úbytek kontaktního materiálu			1,3160

### 7.3.2 Průběhy veličin při testování

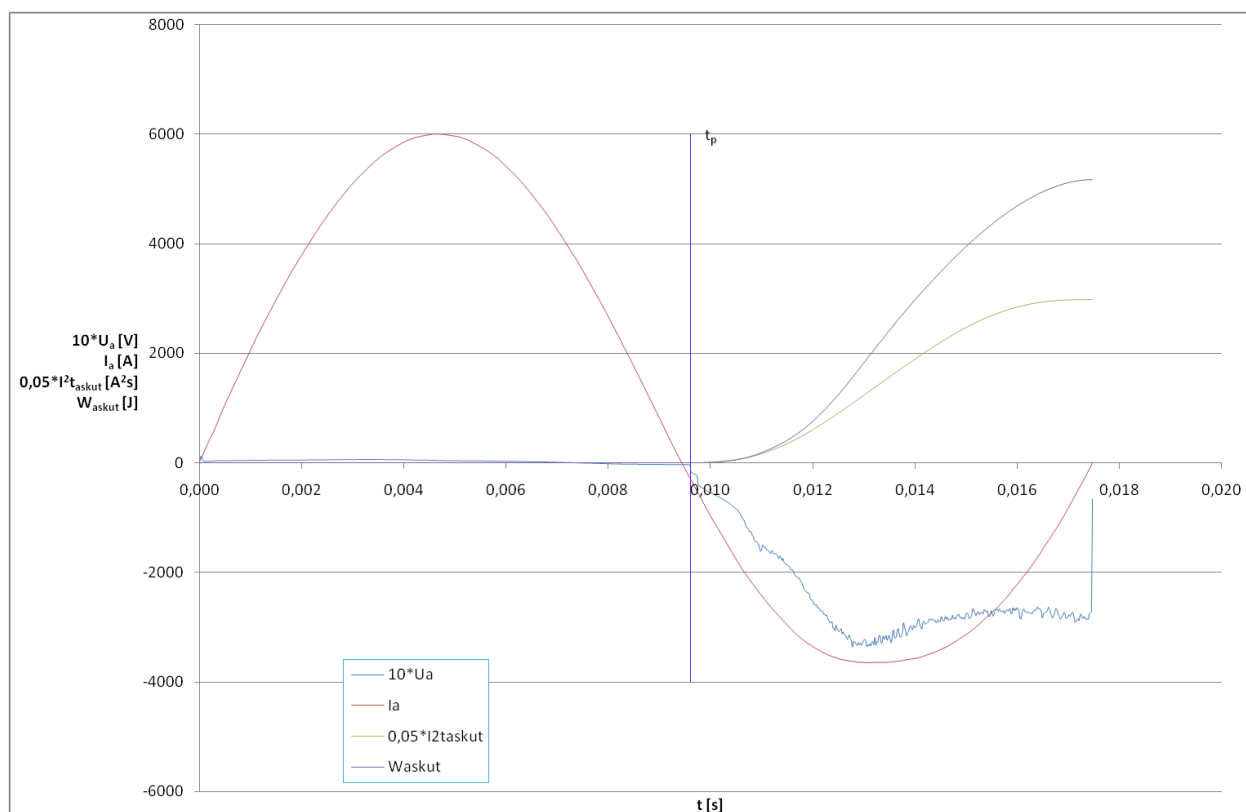


obr. 35: Fáze L1 (1 a 2) - 1. test ( $U = 430$  V;  $I = 4,4$  kA)

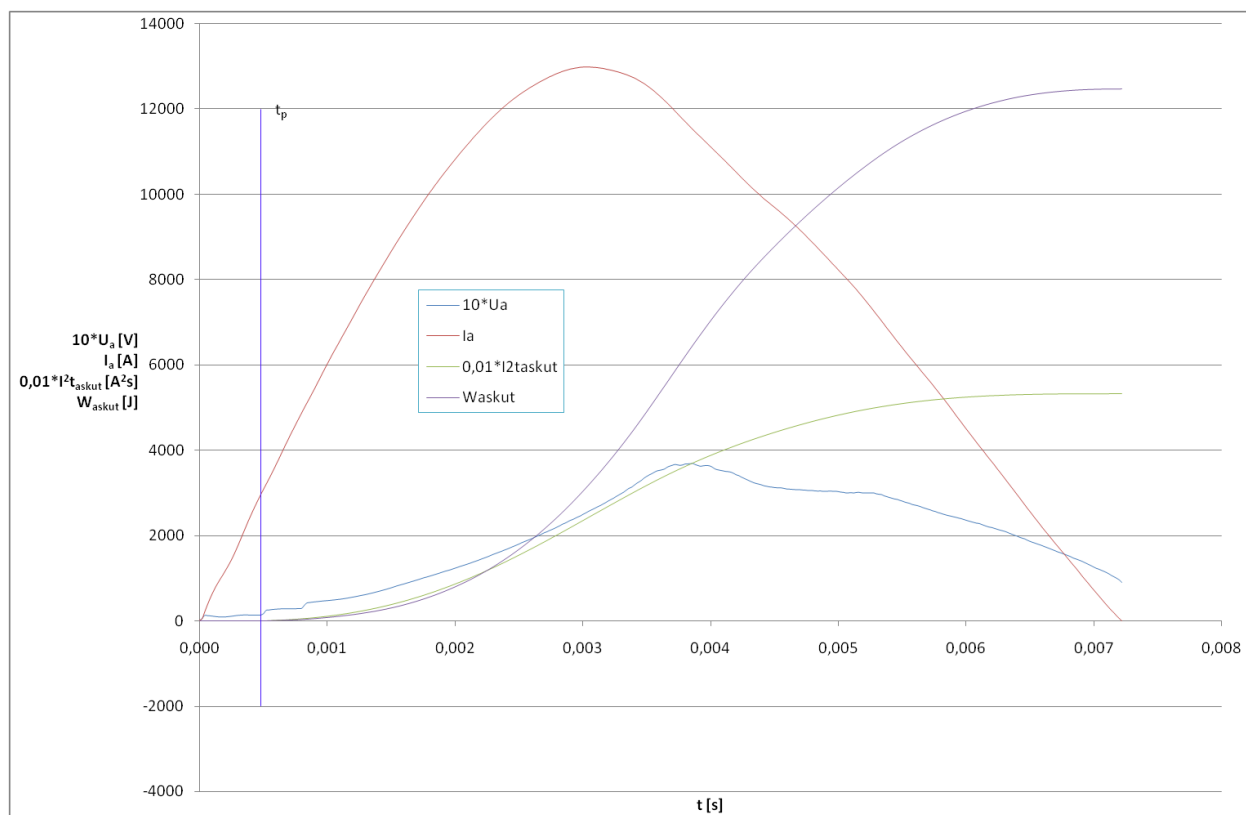


obr. 36: Fáze L1 (1 a 2) - 2. test ( $U = 430$  V;  $I = 4,4$  kA)

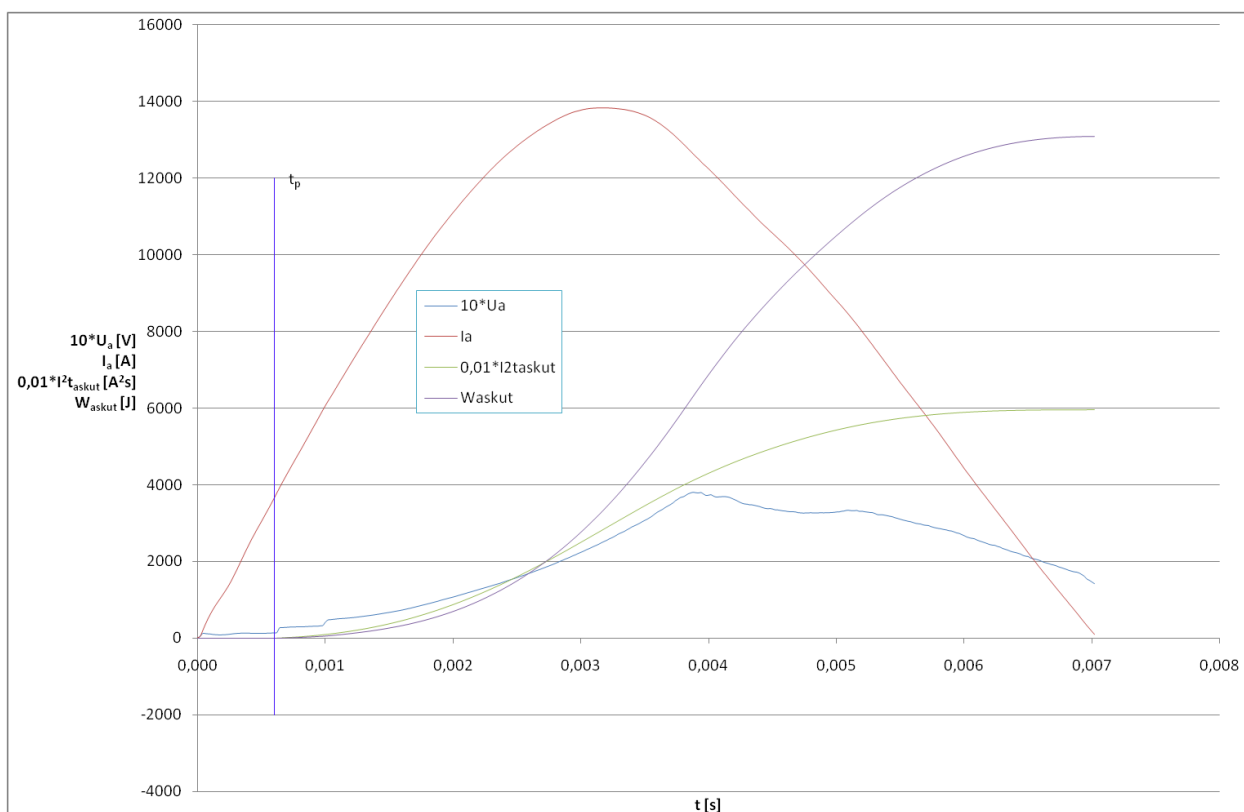




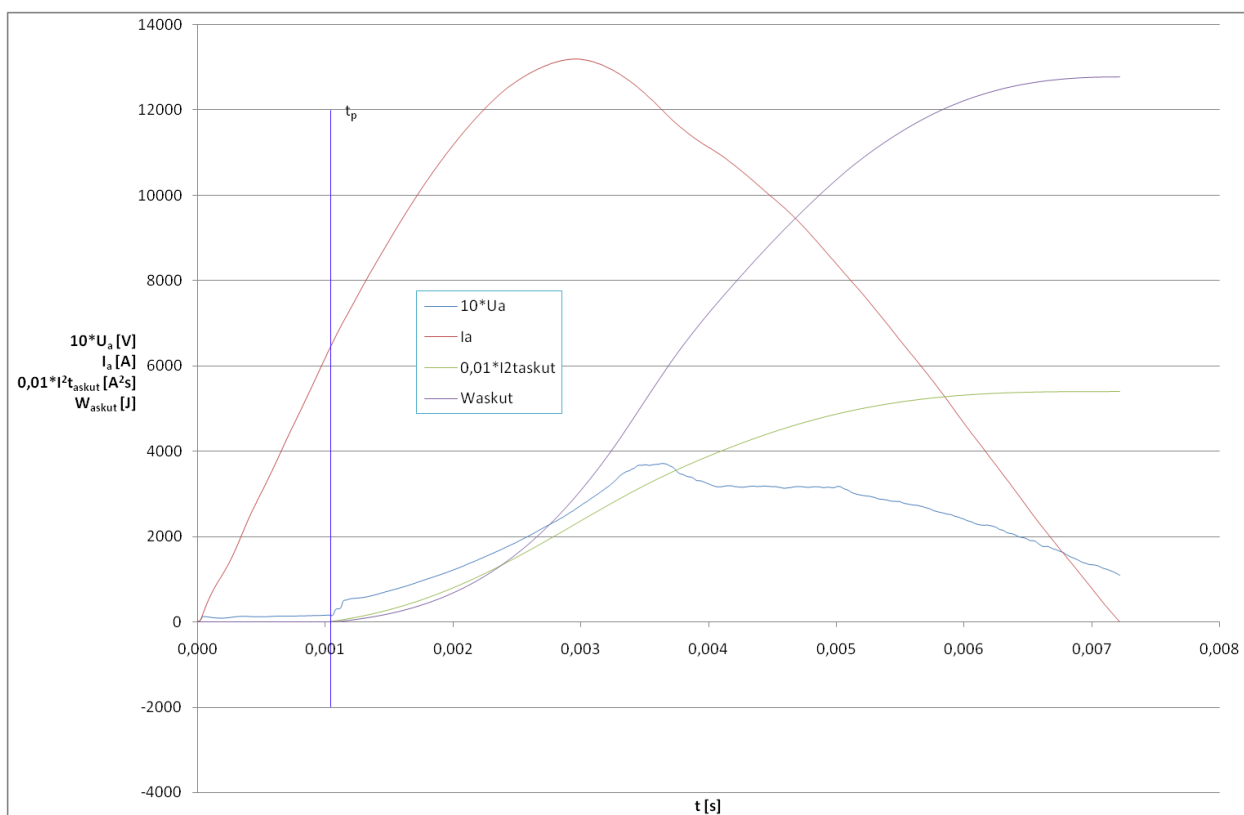
obr. 37: Fáze L1 (1 a 2) - 3. test ( $U = 430 \text{ V}$ ;  $I = 4,4 \text{ kA}$ )



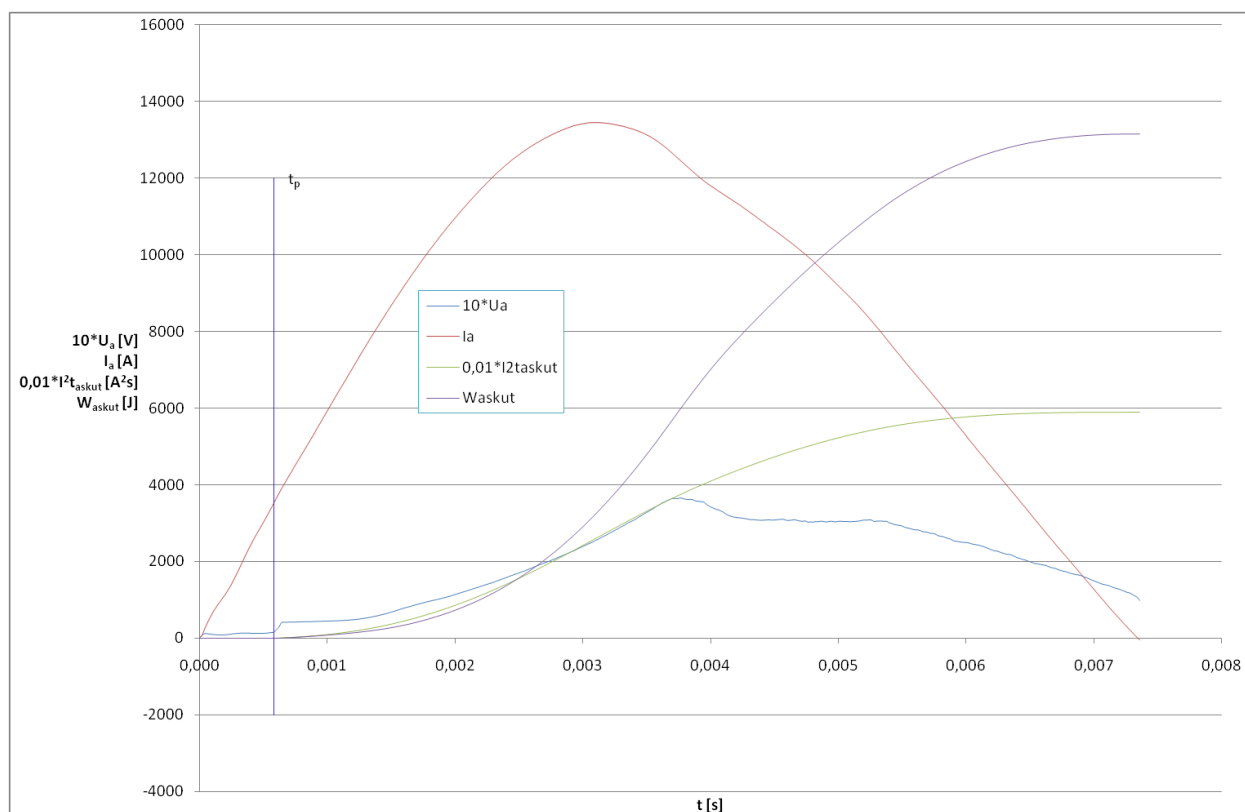
obr. 38: Fáze L1 (1 a 2) - 4. test ( $U = 245 \text{ V}$ ;  $I = 16,89 \text{ kA}$ )



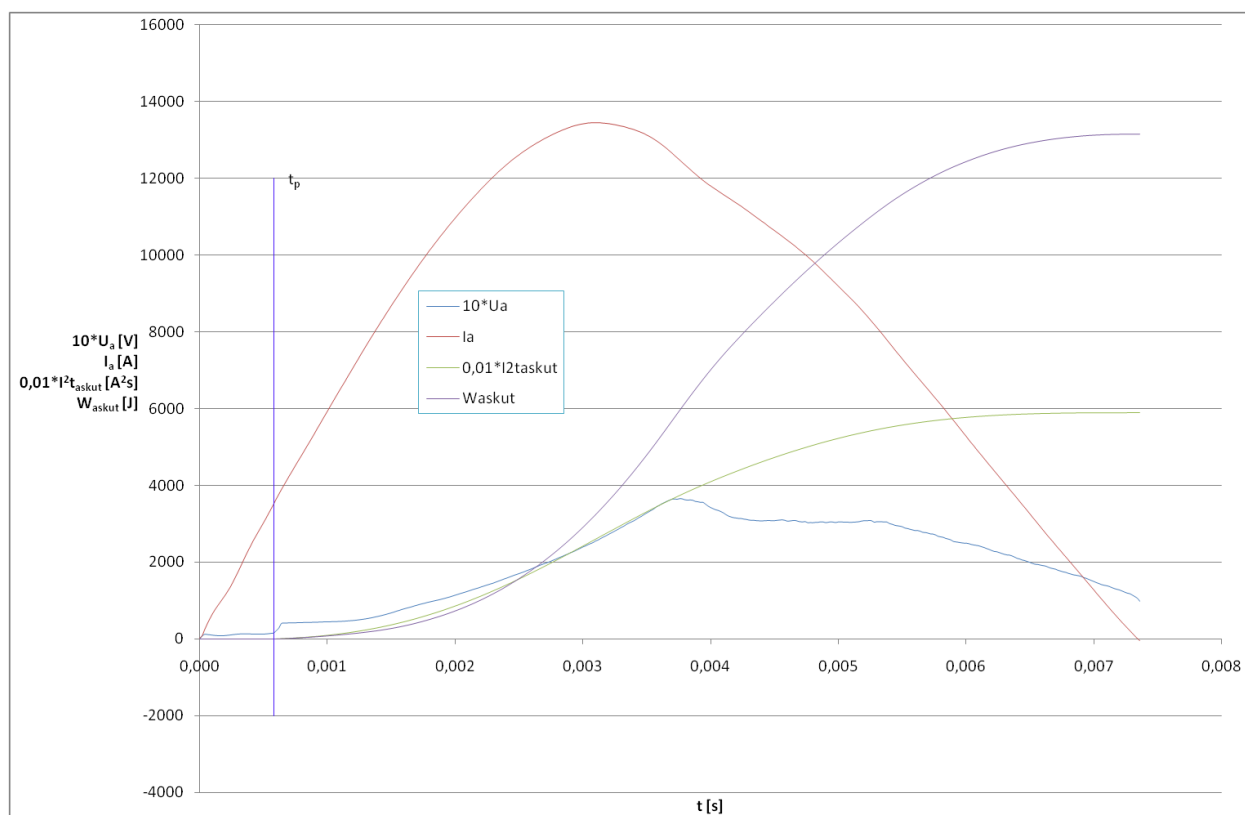
obr. 39: Fáze L1 (1 a 2) - 5. test ( $U = 245$  V;  $I = 16,89$  kA)



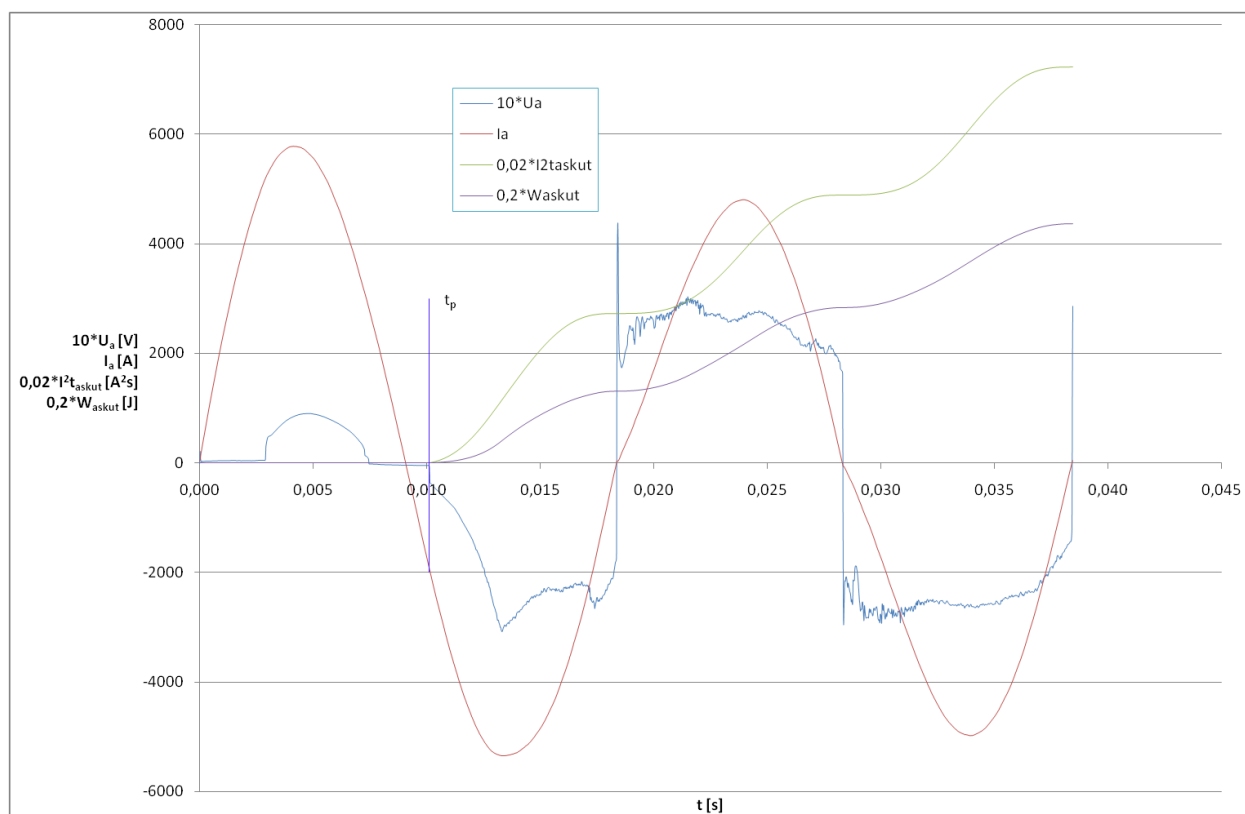
obr. 40: Fáze L2 (3 a 4) - 1. Test ( $U = 245$  V;  $I = 16,89$  kA)



obr. 41: Fáze L2 (3 a 4) - 2. Test ( $U = 245$  V;  $I = 16,89$  kA)



obr. 42: Fáze L2 (3 a 4) - 3. Test ( $U = 245$  V;  $I = 16,89$  kA)



obr. 43: Fáze L3 (5 a 6) - 1. Test ( $U = 730$  V;  $I = 4,43$  kA)

Při testech vyšším napětím netrpí především kontakty, ale zhášecí komory. To bude dáno tím, že oblouk mezi kontakty je dlouhý a působí především v oblasti zhášecí komory. Některá z žebër zhášecí komory byla přepálena a obě komory se při testu dokonce svařily s konstrukcemi pevných kontaktů v místě opalovacích kontaktů. Komory bylo nutné pro převážení odtrhnout, což také muselo mít vliv na výslednou hmotnost kontaktů. Bohužel tímto testem byla fáze 3 jističe zničena a nebylo možné pokračovat v dalším testování. Nutno dodat, že jistič během testu nevypnul, což má za následek vyšší úbytek kontaktního materiálu, ale to je dáno dlouhým časem hoření oblouku a tím i vyšším prošlým Jouleovým integrálem, nikoliv vyšším napětím. Testovací napětí při tomto testu přesáhlo maximální jmenovité napětí přístroje, tj. 690V.

Zhášecí komory fáze L1, která byla testována nižším napětím, vydržely 3 testy. Na fázi L1 tedy ještě bylo možno vyzkoušet test vysokým zkratovým proudem, nicméně ze 3 testů s parametry 430 V; 4,4 kA je jasně vidět, že největší úbytek byl hned při prvním testu, kdy efektivní hodnota obloukového napětí byla nejnižší a prošlý Jouleův integrál největší.



obr. 44: Kontakty fáze L1 po třech testech 430 V, 4,4 kA



**obr. 45: Kontakty fáze L3 po jednom testu 730 V, 4,4 kA**

Na obr. 44 a obr. 45 jsou pro srovnání kontakty fází L1 a L3 po provedených testech při proudu 4,4 kA a napětích 430 V pro L1 a 730 V pro L3.

Kontakty fáze L3 jsou sice poškozené viditelně více, ovšem oblouk zde hořel delší čas, než při všech třech testech fáze L1 dohromady. Kontakty samotné by bylo ještě dále testovat, z důvodu značného poškození zhášecích komor ale bylo od dalších testů upuštěno.

Přistoupili jsme tedy k testování vysokým zkratovým proudem o efektivní hodnotě 16,89 kA při napětí 245 V, kterým jsme zkoušeli kontakty fáze L1 (dvakrát) a L2 (třikrát).

Při těchto testech se již projeví omezující vlastnosti jističe, jelikož efektivní hodnotě 16,89 kA blízkého zkratu by odpovídala hodnota nárazového zkratového proudu cca 30 kA. Z grafů je patrné, že maximální hodnota zkratového proudu se pohybovala v rozmezí 13÷14 kA. Navíc čas vypnutí je vždy menší, než 10 ms, tedy menší než jedna půlperioda.

Úbytky jsou znatelně vyšší, než v případě testování nižším proudem, ovšem vysoké proudy nepůsobí negativně jen na kontakty, ale také na zhášecí komory přístroje. Komory fáze L1 tak vydržely ještě 2 cykly, komory předtím netestované fáze L2 3 cykly. Při testování předchozího přístroje zkratovým proudem 6,24 kA při stejné hodnotě napětí 245 V komory nevykazovaly takové známky poškození, jako při těchto testech.

Kontakty by asi ještě jeden nebo dva testy vydržely, ovšem vzhledem k poškození komor jsme již dále netestovali. Nicméně poškození kontaktů je natolik velké, že další aplikace přístroje do běžného provozu je nemožná.

Stav kontaktů je vidět na obr. 46.



obr. 46: Kontakty fáze L1 po dvou testech 245 V, 16,89 kA



obr. 47: Kontakty fáze L2 po třech testech 245 V, 16,89 kA

## 7.4 Analýza hodnot

Po analýze změřených hodnot jsem došel k závěru, že úbytek kontaktů je tím větší, čím je větší prošlý Jouleův integrál a čím menší je efektivní hodnota obloukového napětí mezi kontakty. Menší napětí značí i menší odpor oblouku a tedy vyšší teplotu jeho jádra, což má za následek i větší teplotu kontaktů a vyšší pohyblivost částic, které jsou pak z kontaktů vytrhávány a unášeny mimo ně do mimokontaktního prostoru.

Po bližším prozkoumání hodnot lze určit experimentální vzorec pro hmotnostní úbytek na jeden testovací cyklus jako poměr prošlého Jouleova integrálu a efektivní hodnoty obloukového napětí. Tento poměr vynásobený konstantou pro kontaktní dvojici pak dává celkový hmotnostní úbytek na 1 cyklus:

$$\Delta m = \frac{I^2 t}{U_{aef}} \cdot K_m \quad (\text{kg; A; s; V; kgA}^{-3}\text{s}^{-4}) \quad (16)$$

Ve srovnání s výpočtem úbytku pomocí vzorce v rovnici (10) je tedy úbytek skutečně funkcí kvadrátu protékajícího proudu, ale zároveň je úbytek závislý i na čase hoření oblouku a na efektivní hodnotě obloukového napětí.

Po propočítání úbytků pro všechna provedená měření jsem vypočetl konstanty pro jednotlivé kontaktní dvojice, které jsme měřili.

- První dvojice testovaná na modelu - AgC-AgW:
  - $K_m = 0,6318 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^2\text{m}^2\text{A}^{-3}\text{s}^{-4}$
- První dvojice testovaná na modelu - AgC-AgWC:
  - $K_m = 0,9131 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^2\text{m}^2\text{A}^{-3}\text{s}^{-4}$
- Kontakty prvního testovaného jističe - AgC-AgW:
  - $K_m = 4,3713 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^2\text{m}^2\text{A}^{-3}\text{s}^{-4}$
- Kontakty druhého testovaného jističe - AgC-AgW:
  - $K_m = 3,3314 \cdot 10^{-4} \text{ kg}^2\text{m}^2\text{A}^{-3}\text{s}^{-4}$

Z konstant plyne, že testované kontaktní dvojice testované na modelu jsou si navzájem podobné, jelikož rozdíl mezi konstantami není veliký.

Podobně je tomu i u kontaktních dvojic testovaných jističů.

Výsledky bohužel nelze porovnat lépe, neboť přesné složení kontaktů jističů není známo.



## 8 ZÁVĚR

Problematika eroze kontaktů je velmi složitá a analyticky v podstatě nepopsatelná. Hodnotit ji lze v podstatě pouze na základě experimentálních pokusů, kdy lze přibližně určit vztahy pro úbytek materiálu během vypínacího procesu.

Po provedení pokusů na mnou navrženém modelu kontaktního systému jsem objevil závislost eroze kontaktů na změřených parametrech při vypínání nadproudů a zkratů. Konkrétně je eroze přímo závislá na hodnotě prošlého Jouleova integrálu, tj. součinu druhé mocniny prošlého proudu a času, po který proud procházel a nepřímo závislá na efektivní hodnotě napětí.

Vyvozená závislost mi přijde logická, neboť vysoké proudy způsobují vysoký nárůst teploty proudovodné dráhy přístrojů a čím déle jsou přístroje účinkům zkratového proudu vystaveny, tím jsou následky horší. Malá velikost efektivní hodnoty obloukového napětí pak ukazuje že oblouk má malý odpor a tedy i vysokou teplotu, což má za následek mnohem horší devastační účinky na kontakty tomuto oblouku vystavené. Vyšší hodnoty obloukového napětí značí dlouhý oblouk s vysokým odporem, který mám nižší teplotu a tím i menší mobilitu plazmatu. Navíc test na jističích ukázal, že oblouky o vyšším napětí jsou likvidovány převážně ve zhášecích komorách, čímž se snižuje účinek na kontakty samotné.

Z naměřených hodnot jsem pak stanovil hodnotu konstanty, kterými je nutno výše uvedený poměr vynásobit, aby bylo možné vypočíst hmotnostní úbytek kontaktů během jednoho vypínacího cyklu.

## CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Bárta, Karel, Zdeněk Vostracký, a kolektiv. Spínací přístroje velmi vysokého napětí. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [2] Havelka, Otto, a kolektiv. Elektrické přístroje. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [3] Havelka, Otto, Zdeněk Vávra, a Dalibor Svoboda. Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1985.
- [4] Silver Based Materials - electrical contacts. 24. Srpen 2014. [http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Silver\\_Based\\_Materials](http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Silver_Based_Materials) (přístup získán Květen 2017).
- [5] Tungsten and Molybdenum Based Materials - electrical contacts. 23. Srpen 2014. [http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Tungsten\\_and\\_Molybdenum\\_Based\\_Materials](http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Tungsten_and_Molybdenum_Based_Materials) (přístup získán Květen 2017).
- [6] Štěpán, František. EATON TOUR 2015 Výběr jisticích a ochranných přístrojů. 25. Listopad 2015. [http://www.profiklubelektrotechniku.cz/\\_files/upload/content/Eaton-Tour-2015-Vyber-jisticich-pristroju-nn-selektivita.pdf](http://www.profiklubelektrotechniku.cz/_files/upload/content/Eaton-Tour-2015-Vyber-jisticich-pristroju-nn-selektivita.pdf) (přístup získán Květen 2017).

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1:       Technická dokumentace pro výrobu modelu kontaktního systému.